

**Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd**

**CHARAKTERIZACE TEPELNÝCH
PROCESŮ PŘI LASEROVÉM
PŘETAVOVÁNÍ POVLAKŮ**

Ing. Marek Vostřák

**disertační práce
k získání akademického titulu doktor
v oboru Fyzika plazmatu a tenkých vrstev**

Školitel: doc. Ing. Milan Honner, Ph.D.

Katedra: Katedra fyziky

Plzeň 2018

**University of West Bohemia
Faculty of Applied Sciences**

**CHARACTERIZATION OF THERMAL
PROCESSES DURING LASER
REMELTING OF COATINGS**

Ing. Marek Vostřák

**Ph.D. thesis
to obtain academic title doctor
in the field Plasma Physics and Physics of Thin Films**

Supervisor: doc. Ing. Milan Honner, Ph.D.

Department: Department of Physics

Pilsen 2018

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni ve spolupráci s odborem Termomechanika technologických procesů vysokoškolského ústavu Nové technologie - výzkumné centrum. Disertační práce byla řešena v rámci projektu Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy CENTEM s registračním číslem CZ.1.05/2.1.00/03.0088, který je spolufinancován z ERDF v rámci programu MŠMT OP VaVpI, a projektu CENTEM+ kód projektu: LO1402

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni 8.8.2018

.....

Ing. Marek Vostřák

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Milanovi Honnerovi, Ph.D. za vedení práce, rady a zkušenosti, které mi pomohly při přípravě disertace. Zároveň děkuji vedoucímu katedry fyziky prof. RNDr. Jaroslavu Vlčkovi, CSc., za všestrannou podporu během mého studia.

Dále bych chtěl poděkovat ostatním kolegům, kteří mi byli nápomocni při řešení mnoha problémů a přispěli k tomu, že vznikla tato práce.

V neposlední řadě chci poděkovat svým rodičům a mé manželce za jejich velkou podporu během celého mého studia.

Obsah

Přehled použitého značení	7
1. Úvod.....	10
2. Současný stav problematiky	11
2.1. Laserové přetavení žárově stříkaných povlaků	11
2.1.1. Žárové nástřiky	11
2.1.2. Proces laserového přetavení povlaku	14
2.1.3. Aplikace laserového přetavení povlaků.....	17
2.2. Charakterizace tepelných procesů laserového zpracování povrchů.....	20
2.2.1. Metody charakterizace tepelných procesů.....	23
2.2.2. Měření infračervenou kamerou	24
2.3. Shrnutí současného stavu problematiky.....	29
3. Cíle disertační práce.....	31
4. Metody zpracování	32
4.1. Metoda laserového přetavení povlaků	32
4.1.1. Laserový systém	32
4.1.2. Způsob přetavování	33
4.1.3. Použité procesní parametry	34
4.2. Experimentální vzorky	35
4.2.1. Označení a rozměry vzorků.....	35
4.2.2. Vyhodnocení hloubky protavení	36
4.3. Použité měřicí systémy	37
4.3.1. Termovizní kamery pracující v pásmu LWIR.....	37
4.3.2. Termovizní kamera pracující v pásmu NIR	39
4.3.3. Analýza termogramů	42
4.4. Vývoj metody charakterizace procesu přetavení	42

4.4.1. Uspořádání experimentu.....	43
4.4.2. Postup vyhodnocení naměřených dat z pohyblivé kamery	46
4.4.3. Postup vyhodnocení naměřených dat ze statické kamery	50
4.4.4. Určení emisivity pro LWIR kamery	54
5. Výsledky a diskuze	59
5.1. Výsledky analýzy procesu přetavování povlaku Stellite	59
5.1.1. Závislost hloubky protavení na procesních parametrech	59
5.1.2. Teplotní charakteristiky procesu přetavení	62
5.1.3. Korelace naměřených výstupů s hloubkou protavení.....	70
5.1.4. Shrnutí analýzy procesu přetavování.....	76
5.2. Zhodnocení navržené metody charakterizace	77
5.2.1. Vliv emisivity na stanovení teplot.....	77
5.2.2. Vliv prostorového rozlišení kamer	83
5.2.3. Vliv časového rozlišení měření	84
5.2.4. Uspořádání a použití měřicího systému	86
6. Závěr	89
Shrnutí.....	91
Resumé.....	92
Literatura.....	94
Seznam publikovaných prací autora	104

Přehled použitého značení

Veličina	Jednotka	Popis
A_D	m^2	Aktivní plocha detektoru
b_p	μm	Hloubka protavení
c	$J/kg \cdot K$	Měrná tepelná kapacita
$D_a \times D_b$	$mm \times mm$	Rozměr svazku
d_{ref}	μm	Šířka oblasti s teplotou vyšší než T_{ref}
E	W/mm^2	Intenzita ozáření
F	-	f-číslo čočky
H	J/mm^2	Dávka ozáření
k	$W/m \cdot K$	Tepelná vodivost
L^{BB}	$W/sr \cdot m^2$	Zář černého tělesa
L_{tot}	$W/sr \cdot m^2$	Celková zář
m	px/mm	Měřítka
M^{BB}	W/m^2	Intenzita vyzařování černého tělesa
M_{obj}	W/m^2	Intenzita vyzařování objektu
M_{refl}	W/m^2	Intenzita vyzařování okolních předmětů
M_{tot}	W/m^2	Celková intenzita vyzařování
M_w	W/m^2	Intenzita vyzařování okna
P	W	Výkon laseru (zářivý tok)
R_D	V/W	Odezva detektoru
T	$^{\circ}C$	Teplota
t	s	Čas
$T^*_{LWIR}(t)$	$^{\circ}C$	Průměrný průběh teploty vyhodnocený ze statické LWIR kamery
$T^*_{NIR}(x)$	$^{\circ}C$	Průměrný průběh teploty vyhodnocený z pohyblivé NIR kamery
$T^*_{p_pr}$	$^{\circ}C$	Průměrná teplota oblasti interakce z pohyblivé kamery
$T^*_{p_pr}$	$^{\circ}C$	Maximální teplota oblasti interakce z pohyblivé kamery
$T^*_{s_pr}$	$^{\circ}C$	Průměrná teplota oblasti interakce ze statické kamery
$T^*_{s_pr}$	$^{\circ}C$	Maximální teplota oblasti interakce ze statické kamery
t_0	s	Čas počátku přejezdu
T_{atm}	$^{\circ}C$	Teplota atmosféry
T_{det}	$^{\circ}C$	Změřená teplota

T_{\max}	$^{\circ}\text{C}$	Maximální teplota
t_{\max}	s	Čas konce přejezdu
T_{obj}	$^{\circ}\text{C}$	Reálná teplota objektu
T_p	$^{\circ}\text{C}$	Teplota přehřevu
$T_{\text{ref_chl}}$	$^{\circ}\text{C}$	Referenční teplota chladnutí
$T_{\text{ref_t}}$	$^{\circ}\text{C}$	Referenční teplota tavení
v	mm/s; cm/min	Procesní rychlost
$V(t)$	V	Výstupní signál měřicího systému - napětí
$\Delta t_{\text{chl(ref)}}$	s	Doba chladnutí na referenční teplotu
Δt_{oh}	s	Doba ohřevu
ε	-	Emisivita
ε_b	-	Emisivita referenční barvy
ε_{det}	-	Stanovená emisivita objektu
$\varepsilon_{\text{LWIR}(t)}$	-	Časový průběh emisivity pro LWIR kameru
ε_n	-	Emisivita nepřetaveného povrchu
ε_{obj}	-	Reálná emisivita objektu
$\varepsilon_{p(i)}$	-	Emisivita povrchu přetaveného danými parametry
$\varepsilon_{\text{refl}}$	-	Emisivita okolních předmětů
$\varepsilon_{\text{vt}(t)}$	-	Průběh emisivity za vysokých teplot pro LWIR kameru
λ	nm	Vlnová délka
τ	-	Propustnost (transmitance)
τ_{atm}	-	Propustnost atmosféry
τ_{opt}	-	Propustnost optiky
τ_w	-	Propustnost okna

Zkratka	Popis
ADC	Analog to Digital Converter (analogově digitální převodník)
CCD	Charged Coupled Device (zařízení s vázanými náboji - součástka na snímání obrazové informace)
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor (komplementární polovodič kov oxid - technologie při výrobě integrovaných obvodů)
CVD	Chemical Vapour Deposition (chemická depozice z plynné fáze)
fcc	Face-centred cubic (kubická plošně středěná mřížka)
FPA	Focal plane arrays (detekční pole v ohniskové rovině)
hcp	Hexagonal close-packed (hexagonální mřížka s těsným uspořádáním)

HPDD	High Power Direct Diode (vysokovýkonný přímý diodový laser)
HVOF	High Velocity Oxygen Fuel (vysokorychlostní nástřik s kyslíkovým palivem)
IR	Infrared Radiation (záření v infračerveném spektru vlnových délek)
LWIR	Long wavelength infrared (dlouhé vlnové délky infračerveného záření)
NIR	Near infrared (blízké infračervené záření)
PVD	Physical Vapour Deposition (fyzikální depozice z plynné fáze)
px	Pixel (picture element - obrazový prvek)
QWIP	Quantum Well Infrared Photodetector (kvantový infračervený detektor)
SEM	Scanning Electron Microscope (řádovací elektronový mikroskop)
SLM	Selective Laser Melting (selektivní laserové tavení - způsob vytváření dílů tavením prášku)

1. Úvod

Technologie žárového stříkání jsou velmi rozšířené fyzikální metody depozice funkčních povlaků se speciálními vlastnostmi, jako je například vysoká tvrdost, nízký koeficient tření, odolnost proti opotřebení, korozi či vysokým teplotám. Takové povlaky nacházejí uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu a jsou předmětem intenzivního výzkumu. Vzhledem ke specifickému způsobu vytváření mají tyto povlaky charakteristickou strukturu, ve které se ale často vyskytují různé imperfekce, jako jsou nedostatečně natavené částice, oxidy a póry. Tyto imperfekce mohou negativně ovlivňovat funkčnost těchto povlaků. Dodatečné tepelné zpracování je jedním ze způsobů používaných pro snížení vad ve struktuře povlaku a zvýšení jejich funkčních vlastností.

Významným nástrojem používaným pro modifikaci povrchu materiálů je laser, což dokazují běžně rozšířené technologie laserového kalení či povlakování. Podobně našel laser uplatnění i pro tepelné zpracování povlaků vytvářených žárovými nástřiky. Laserovým přetavováním povlaků se zabývá řada vědeckých institucí u nás i ve světě. Pro opakovatelné dosažení požadovaných výsledků je vhodné proces přetavení vhodným způsobem charakterizovat a řídit. V již zmíněných technologiích laserového kalení či povlakování se pro řízení procesů často využívají metody bezkontaktního měření teplot. Použití těchto metod se jeví vhodné i pro výzkum tepelných procesů při laserovém přetavování povlaků a je proto předmětem této práce.

Tato disertační práce, řešená na Katedře fyziky Fakulty aplikovaných věd ve spolupráci s odborem Termomechanika technologických procesů vysokoškolského ústavu Výzkumné centrum – Nové technologie, navazuje na předchozí experimenty v oblasti laserového přetavování povlaků. Zabývá se možností využití bezkontaktních měřicích metod ve výzkumu tepelných procesů probíhajících při laserovém přetavování povlaků. Cílem práce je vývoj nové komplexní metody charakterizace tepelných procesů za využití termovizních kamer a především pak analýza vztahů mezi výsledky měření, technologickými parametry a stavem povlaku po přetavení.

2. Současný stav problematiky

V této kapitole je představen aktuální stav problematiky, které se věnuje tato práce. V první části jsou popsány žárově stříkané povlaky, jejich vlastnosti, způsoby vytváření a možnosti jejich modifikace pomocí vysokovýkonných laserů. Dále jsou popsány možnosti diagnostiky tepelných dějů, především pak využití infračervené termografie k měření laserových procesů.

2.1. Laserové přetavení žárově stříkaných povlaků

2.1.1. Žárové nástřiky

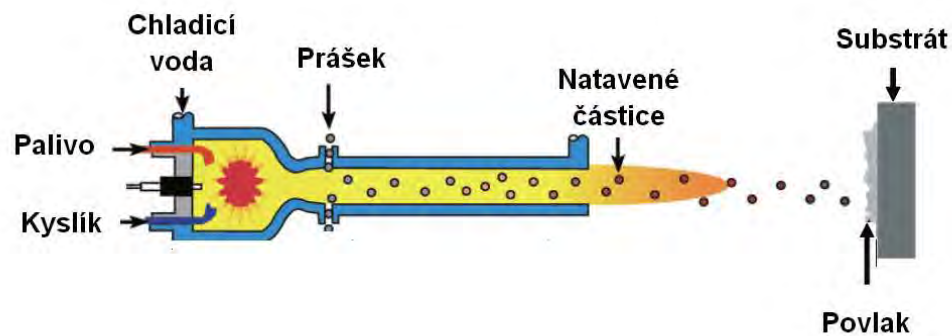
Nároky na vyšší účinnost a delší životnost součástí používaných v různých odvětvích průmyslu vyzdvihují důležitost úpravy a modifikace povrchů. Významnou technologií v této oblasti je metoda žárových nástřiků. Touto technologií lze vytvářet povlaky o tloušťce větší než 100 μm na velké plochy vysokou aplikační rychlostí. Je možné nanášet různé materiály, jako jsou kovy, keramika či plasty [1]. Takto vytvořené povlaky pak slouží například jako ochrana proti opotřebení či korozi nebo jako tepelné bariéry. Proces vytváření povlaku metodou žárového nástřiku je založen na depozici kapek nataveného materiálu, na rozdíl od depozice v řádu atomů pomocí metod PVD (Physical Vapour Deposition) a CVD (Chemical Vapour Deposition). Následným tepelným zpracováním lze modifikovat mikrostrukturu povlaků a tím zlepšit jejich funkční vlastnosti.

Metody žárových nástřiků

Metody žárových nástřiků se řadí do několika skupin dle způsobu generování energie pro roztavení a urychlení částic nanášeného materiálu: elektrický oblouk, spalování, rozpínání plynu [1]. Tyto skupiny se dále dělí již na konkrétní metody.

Mezi často používané metody žárových nástřiků patří metoda supersonického nástřiku HVOF (High Velocity Oxygen Fuel), která je využita i v této práci. Tato metoda je založena na speciálním designu hořáku (Obr. 2.1), ve kterém dochází k hoření směsi kyslíku a paliva, kterým je kerosin, acetylen, propan, propylen, vodík a další. Výsledné spaliny mají vysoký tlak, až 1 MPa a v konvergentně-divergentní trysce jsou urychlovány na vysokou rychlost. Materiál je ve formě prášku přiváděn do plamene, kde dojde k jeho natavení a urychlení až na

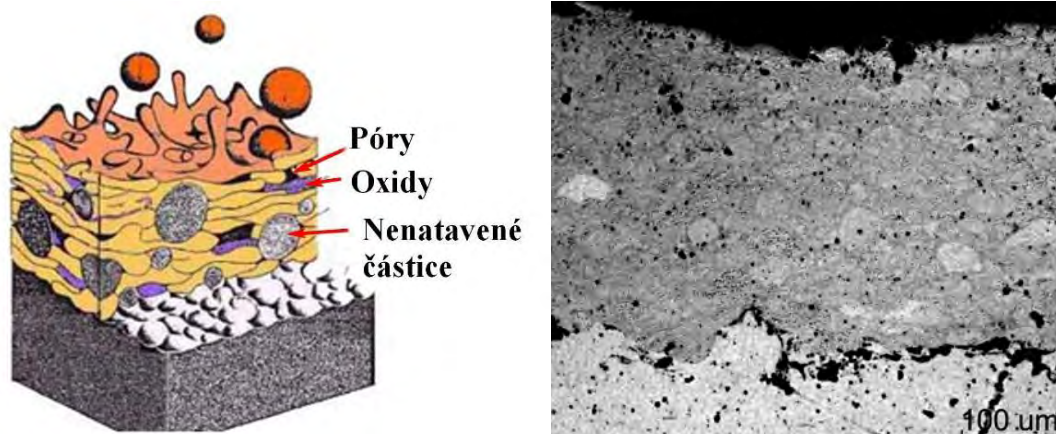
rychlosti 1000 m/s. Díky vysoké rychlosti částic a nižší teplotě je tato metoda velmi efektivní například při depozici cermetů a dalších korozivzdorných slitin [2].



Obr. 2.1: Schéma HVOF technologie [2]

Struktura žárově stříkaného povlaku

Během procesu žárového nástřiku je materiál ve formě prášku či drátu přiváděn do zdroje tepla, ve kterém dochází k částečnému nebo úplnému natavení materiálu a ten je pak urychlován směrem k substrátu. Po dopadu natavené částice materiálu na substrát dojde k jejímu výraznému zploštění a rychlému ztuhnutí. Jedna tato částice se nazývá splat. Postupným nanášením a vrstvením splatů se pak vytváří povlak, který má charakteristickou lamelární strukturu. V této struktuře se ovšem objevují různé imperfekce, jako jsou například nedostatečně natavené částice, oxidy a póry. Příklad struktury žárového nástřiku je na Obr. 2.2. Množství těchto vad závisí na použité technologii nástřiku. Při nástřiku plamenem je kvalita povlaku nízká. Naopak HVOF nástřik má obvykle nízkou pórovitost a malé množství nenatavených částic. Během procesu nedochází k natavení substrátu a vazba nástřiku se substrátem je tudíž pouze mechanická [3, 4].



Obr. 2.2: Struktura žárového nástřiku, schematická (vlevo)[5],
HVOF nástřik NiCrBSi (vpravo)[6]

Vlastnosti žárově stříkaných povlaků

Mechanické a fyzikální vlastnosti žárově stříkaných povlaků jsou ovlivněny jejich strukturou. Pro případné následné tepelné zpracování jsou důležité zejména termomechanické vlastnosti. Tepelná vodivost k závisí na struktuře povlaku – porositě povlaku, velikosti jednotlivých splatek a jejich kontaktu, množství a povaze vad ve struktuře a na fázovém složení. Tepelná vodivost žárových nástřiků je proto anizotropní. Při tepelném zpracování povlaku dochází ke spojování jednotlivých částic a k redukci vad ve struktuře a z tohoto důvodu tepelná vodivost roste [1].

Měrná tepelná kapacita c závisí na chemickém složení materiálu a je tak ovlivněna mírou oxidace jednotlivých částic při nástřiku, protože tím dochází ke změně chemického složení [1].

Tepelné zpracování povlaků

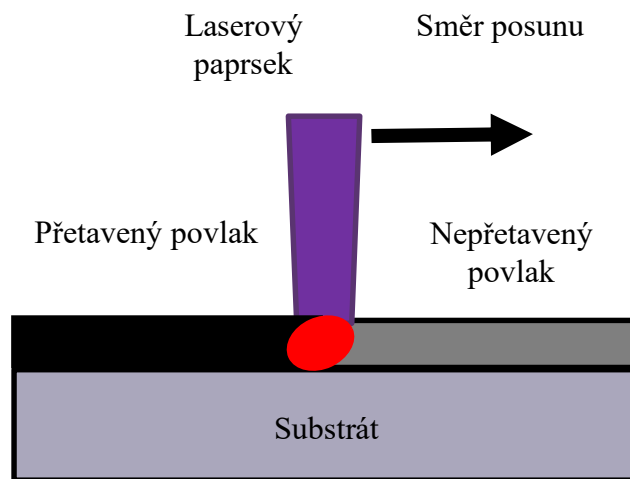
Vzhledem k nedostatkům ve struktuře povlaků se otevírá možnost následného tepelného zpracování za účelem zlepšení jejich struktury a tím i zvýšení jejich funkčních vlastností. Přetavením povlaků může dojít ke snížení obsahu pórů a k odstranění hranic mezi jednotlivými splateky. Vytvoří se kompaktní homogenní struktura. V některých případech může dojít i k vytvoření pevné metalurgické vazby mezi povlakem a substrátem.

Pro následné tepelné zpracování žárově stříkaných povlaků se naskýtá několik možností. Možné je například přetavení plamenem [7, 8], v peci [9] nebo pomocí vysokovýkonného laseru [10–14]. Při použití plamene je proces přetavení méně stabilní a může dojít

k nerovnoměrnému přetavení na různých místech vzorku. Při přetavení v peci je nevýhoda, že tepelným zpracováním prochází celý zpracovávaný díl a dochází tedy k nežádoucímu tepelnému ovlivnění substrátu.

2.1.2. Proces laserového přetavení povlaku

Při použití laseru pro tepelné zpracování povlaků je laserové záření pohlceno na povrchu materiálu, absorbovaná energie je následně převedena na teplo a vrstva povlaku je velmi rychle ohřáta a natavena. Následně je teplo odvedeno do substrátu a povrchová vrstva opět ztuhne. Schéma procesu je znázorněno na Obr. 2.3.



Obr. 2.3: Schéma procesu laserového přetavení povlaku

Při přetavení pomocí laseru je úroveň změn ve struktuře závislá na celkové energii vnesené do povlaku a tedy na zvolených procesních parametrech. Úroveň změn struktury povlaku lze ovlivňovat například laserovým výkonem [15] či procesní rychlostí [16]. Při správném nastavení procesních parametrů je možné povlak přetavit například jen částečně do určité hloubky nebo až k rozhraní se substrátem, čímž dojde k vytvoření metalurgické vazby.

Rozložení teploty během procesu je přímo ovlivněno množstvím dodané energie do povlaku, a tedy přímo závislé na zvolených procesních parametrech. Rychlý ohřev a následné rychlé ochlazení má za následek vznik zbytkového napětí v povlaku [17]. Velké teplotní gradienty a tedy vysoké napětí vnesené do povlaku mohou vést ke vzniku prasklin [13, 18]. Tvorbě prasklin lze předejít volbou procesních parametrů a také předehřevem před zpracováním a následně řízeným chladnutím zpracovávané části [8, 9, 19]. Dalším rizikem je tvorba bublin

v přetaveném povlaku. Vznik bublin je zapříčiněn tím, že expandující plyn z pórů v tavenině nestačí před ztuhnutím dosáhnout povrchu a rozptýlit se. K tomu může dojít, pokud má přetavovaný povlak porozitu vyšší než 2 % [19].

Metody laserového přetavení

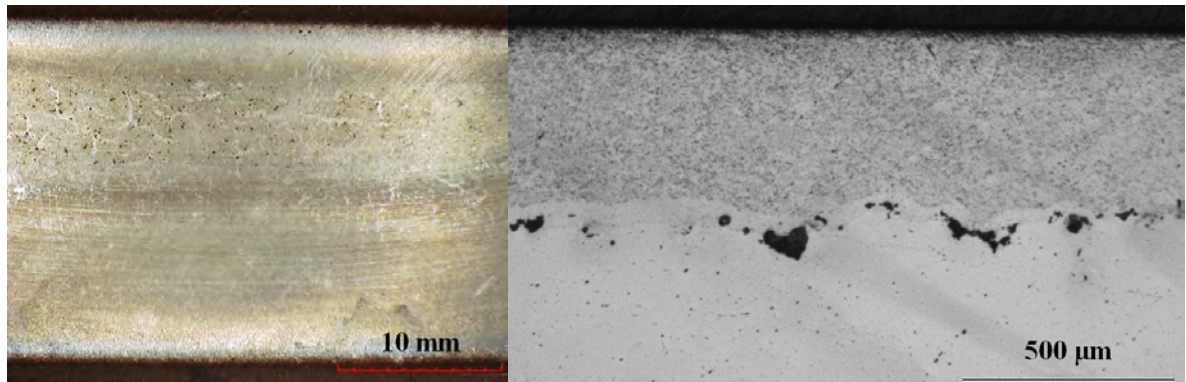
Pro laserové přetavení povlaků se používají především diodové [11, 14], pevnolátkové [10, 12, 20] a CO₂ lasery [21–23] o výkonu několik kW. V závislosti na použitém technologickém příslušenství existují různé metody přetavení.

V první metodě je využita technologická hlava s optikou vytvářející široký laserový svazek. Posunem tohoto širokého svazku po povrchu se dosáhne přetavení jedné široké stopy a pro přetavení větších ploch se pak využije napojení těchto stop. Šířka stopy je daná konstrukcí laseru či laserové hlavy a nejde tak uzpůsobit k přetavení menších ploch. Dále mají tyto lasery či laserové hlavy menší pracovní vzdálenost a lze tak obtížně přetavit tvarově komplikovaný díl nebo díl umístěný ve vakuové komoře. Tato metoda laserového zpracování povrchů se také nejčastěji používá při laserovém kalení [24].

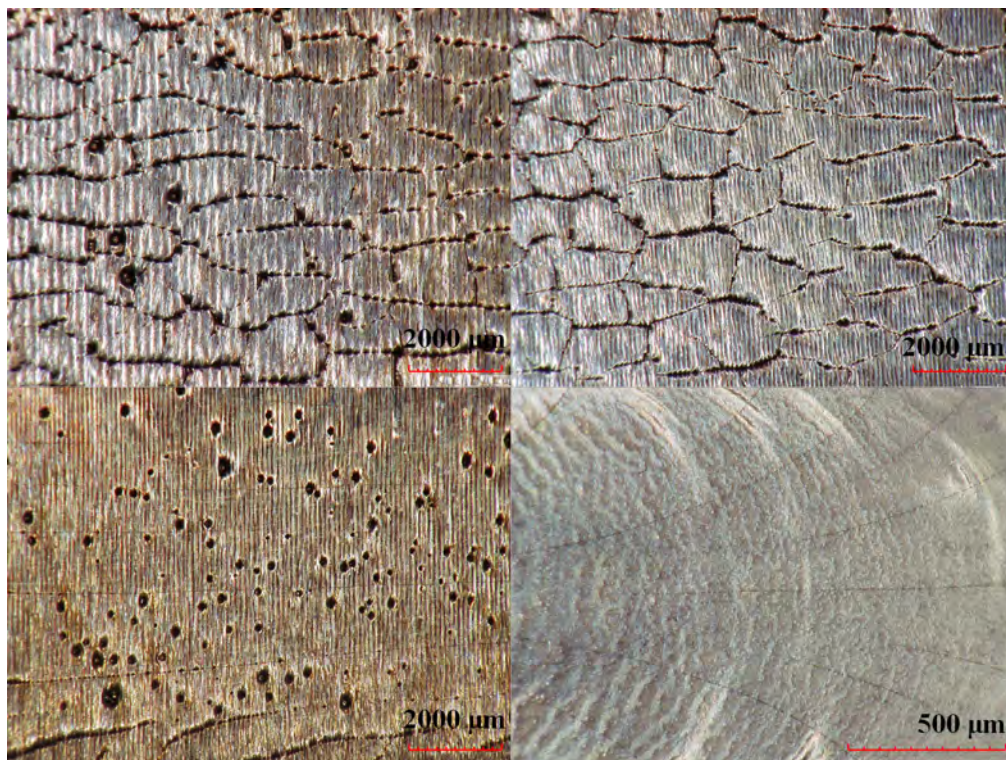
Ve druhé metodě je využita tzv. skenovací hlava, která umožňuje vychylování laserového svazku vysokou rychlostí pomocí galvanicky řízených zrcátek. Skenovací hlavy se využívají například při laserovém značení, gravírování či svařování. Při přetavování za využití skenovací hlavy je laserový svazek s malým průměrem rozkmitán a posouván s velkým překryvem stop. Skenovací hlavy mají větší pracovní vzdálenost a lze tak snadněji zpracovávat tvarově komplikovanější díly. Obdobná metoda může také být též využita na laserové kalení [25, 26].

Porovnání těchto metod bylo popsáno na příkladu přetavení HVOF povlaku NiCrBSi [27]. Při použití HPDD (High Power Direct Diode) laseru s rozměrem svazku 10 × 6 mm bylo po optimalizaci procesních parametrů dosaženo přetavení povlaku bez prasklin. Toho bylo dosaženo kombinací výkonu 1 kW, procesní rychlosti 7 cm/min a předehřevu vzorku. Na Obr. 2.4 je uveden stav povlaku po přetavení těmito parametry. Pro skenovací metodu byl využit pevnolátkový laser Trumpf a skenovací hlava Scanlab inteliWELD 30 FC V. Bylo zkoušeno několik způsobů variant skenování povrchu a různé kombinace parametrů, avšak vhodné parametry pro přetavení povlaku NiCrBSi bez vad nebyly nalezeny. Ukázalo se, že při nevhodně zvolených parametrech může docházet k přílišné tvorbě prasklin na povrchu a vzniku dalších vad. Ukázka struktury povrchu povlaku NiCrBSi po přetavení skenovací

metodou je na Obr. 2.5. Příčina většího rizika tvorby prasklin je, že při této metodě je použita mnohem vyšší intenzita ozáření a vyšší procesní rychlost než při přetavení se širokým svazkem. Metoda se skenovací hlavou tak není vhodná na přetavení struktur žárově stříkaných povlaků.



Obr. 2.4: NiCrBSi povlak přetavený HPDD laserem; povrch (vlevo), řez (vpravo) [27]



Obr. 2.5: Stav povrchu povlaku NiCrBSi po přetavení skenovací metodou [27]

Nevýhodou přetavování žárově stříkaných povlaků je, že se jedná spolu s nástřikem o dvoukrokový proces. Vzhledem k potřebě dvojího vybavení, vyššího času zpracování a přesunu dílů mezi pracovišti, se zvyšují náklady na zpracování. V případě přetavení povlaku pomocí

laseru lze však vytvořit jedno sloučené zařízení a povlaky přetavovat přímo při procesu žárového stříkání [11, 13].

2.1.3. Aplikace laserového přetavení povlaků

Laserové přetavení za účelem zlepšení funkčních vlastností je možné použít na řadu různých materiálů. Přetavením slitin na bázi železa lze například zvýšit jejich odolnost proti korozi [16]. Ve studii [28] je prezentováno zlepšení mechanických vlastností po přetavení HVOF povlaku Inconelu 625, slitiny na bázi niku. Přetavovat lze i materiály, jako je například HVOF povlak WC-CrC-Ni, kombinace karbidu wolframu a karbidu chromu v niklové matici. Přetavením tohoto povlaku vhodnými parametry lze dosáhnout výrazného snížení pórovitosti povlaku, zvýšení mikrotvrlosti a značného zvýšení odolnosti proti opotřebení [29].

Mezi často přetavované povlaky patří slitiny ze skupiny MCrAlY, kde M je kobalt (Co), nikl (Ni) nebo jejich kombinace. Ve studii [19] je popsáno laserové přetavení plasmově stříkaného povlaku CoNiCrAlY, kdy po přetavení má povlak díky změně mikrostruktury vyšší odolnost proti oxidaci a korozi horkým plynem. Ve studii [21] je uvedeno, že laserové přetavený povlak má vyšší odolnost proti korozi a houževnatost než původní nepřetavený povlak. Dále ve studii [30] popisují přetavení povlaku CoNiCrAlY pomocí elektronového paprsku a laseru, kdy přetavený povlak má vyšší odolnost proti oxidaci za zvýšené teploty.

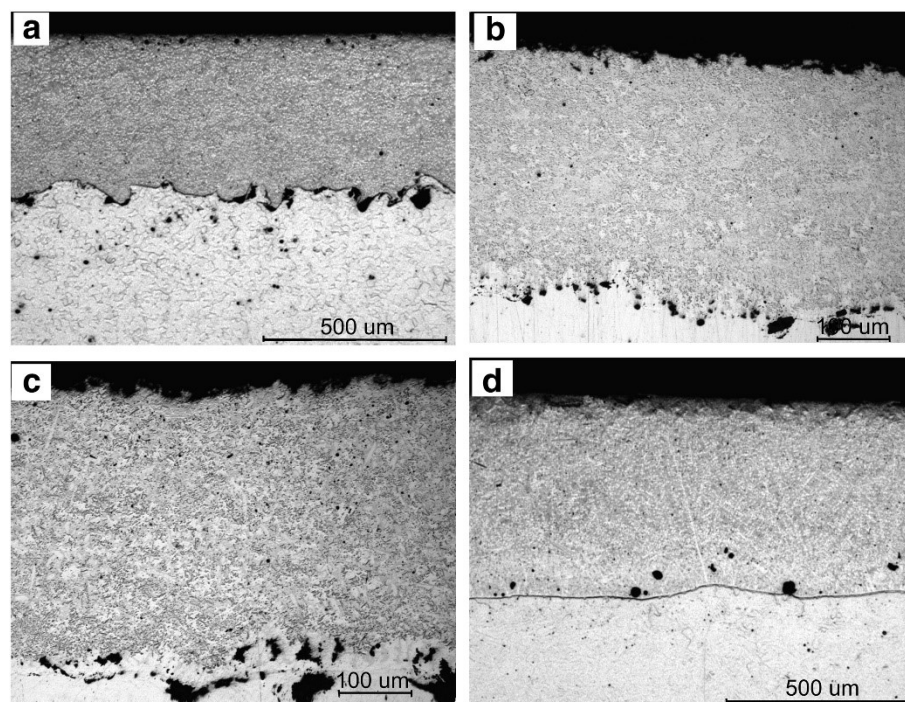
Povlak NiCrBSi

Ochranné povlaky ze slitiny NiCrBSi mají široký rozsah použití v průmyslu, například pro nástroje používané při výrobě papíru, při výrobě skleněných forem nebo v chemickém průmyslu [9]. Tyto slitiny lze snadno přetavovat, a to především díky obsahu bóru a křemíku, které snižují teplotu tavení. Přítomnost chromu zvyšuje odolnost proti korozi, především v zásaditém prostředí [31]. Dále přítomnost uhlíku umožňuje vznik karbidů, které zvyšují tvrdost povlaku a jeho odolnost proti opotřebení [11]. Přetavením NiCrBSi povlaku lze zvýšit především jeho odolnost proti opotřebení a proti korozi [11, 13, 14].

Ve studiích [6, 32] bylo provedeno podrobné srovnání vlastností nepřetaveného HVOF povlaku NiCrBSi, povlaku přetaveného HPDD laserem, plamenem, v peci a využitím elektrického odporového ohřevu. Procesní parametry laserového přetavení byly následující: dávka ozáření $H = 76,4 \text{ J/mm}^2$, výkon laseru $P = 1070 \text{ W}$, procesní rychlost $v = 7 \text{ cm/min}$,

velikost svazku 12×6 mm a použití předehřevu vzorku na teplotu $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kombinace těchto procesních parametrů vedla k přetavení povlaku bez vzniku trhlin.

Na Obr. 2.6 je zobrazeno porovnání mikrostruktury povlaků přetaveného různými metodami. Laserové přetavení přineslo největší změny struktury povlaku od původního HVOF nástřiku. Po přetavení plamenem nevznikla metalurgická vazba se substrátem a je zachováno původní rozhraní se substrátem. Při přetavení elektrickým odporovým ohřevem a v peci došlo k částečnému prolnutí materiálu na rozhraní. Ve všech případech došlo k vymizení hranic mezi původními sploty a přetavené povlaky neobsahují téměř žádné póry [6, 32].



Obr. 2.6: Řezy NiCrBSi povlaku přetaveného různými metodami z OM;
a) přetavení plamenem, b) elektrickým odporem, c) v peci, d) laserem [6]

Ve studiích [6, 32] je zaznamenán pokles povrchové drsnosti po všech způsobech přetavení. Nejlepší stav povrchu je dosažen po přetavení laserem. Nejvyšší povrchová tvrdost je naměřena pro povlak bez přetavení. Mikrotvrdost je vyšší u povlaku přetaveného plamenem nebo elektrickým odporem a naopak nižší u povlaku přetaveného v peci a laserem. Na pokles mikrotvrdosti má vliv především změna v mikrostruktuře povlaku. HVOF povlak obsahuje dobře rozptýlené malé precipitáty, při přetavení dochází k růstu těchto precipitátů a změně jejich rozložení. Pokles mikrotvrdosti jako důsledek přetavení je popsán i v dalších studiích [9, 12, 33, 34]. V rozporu s poklesem tvrdosti však přetavené povlaky vykazaly nárůst

odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Toto zvýšení odolnosti proti opotřebení je způsobené nárůstem vnitřní koheze po odstranění hranic mezi jednotlivými sploty [6, 32].

Test v solné mlze prokázal zvýšenou korozní odolnost pro přetavené povlaky [6, 32]. Zvýšení odolnosti je dáno především odstraněním pórů a hranic mezi jednotlivými sploty, čímž vznikne kompaktnější bariéra proti vniknutí korozního prostředí k substrátu. Pozitivní vliv eliminace pórů na odolnost proti korozi je v souladu se zjištěním dalších autorů [14]. Bylo prokázáno, že pozitivní vliv na korozní odolnost má též tenká oxidická vrstva vytvořená na povrchu po přetavení [12].

Povlak Stellite

Další často používanou skupinou materiálů na ochranné povlaky jsou slitiny komerčně označované jako Stellite. Je to řada slitin kobaltu a chromu s přídavkem wolframu, uhlíku a dalších prvků, v závislosti na konkrétním typu Stellite. Kobalt je v těchto slitinách díky legujícím prvkům v kubické plošně středěné mřížce. Přítomnost chromu zvyšuje odolnost proti korozi. Dále chrom, wolfram, molybden a další prvky tvoří karbidy a zvyšují tak pevnost materiálu a odolnost proti opotřebení. Ochranné povlaky Stellite se používají například v chemickém průmyslu, u výměníků tepla, částí pecí a parních kotlů a podobně. Tyto povlaky lze vytvářet jak metodami žárových nástřiků nebo například metodou laserového povlakování [35–41]. Přetavením žárově stříkaného povlaku Stellite lze snížit jeho porozitu a zvýšit jeho odolnost proti korozi [42].

Ve studii [43] je provedeno porovnání vlastností čtyř variant povlaku Stellite 6 a to nepřetaveného HVOF povlaku, částečně přetaveného HVOF povlaku, plně přetaveného HVOF povlaku a povlaku vytvořeného metodou laserového povlakování. Dvě varianty přetavení HVOF povlaku se liší hloubkou protavení, v prvním případě se jedná o částečné přetavení do poloviny tloušťky povlaku a ve druhém případě o plné přetavení povlaku a vytvoření metalurgické vazby se substrátem. Částečného přetavení povlaku je dosaženo při použití nižší dávky ozáření než pro plné přetavení. Různé dávky ozáření bylo dosaženo změnou procesní rychlosti při konstantním výkonu. Výsledné parametry pro částečné a plné přetavení povlaku byly následující: $H = 21,4$ a $42,8 \text{ J/mm}^2$, $P = 1070 \text{ W}$, $v = 25$ a $12,5 \text{ cm/min}$, velikost svazku $12 \times 1 \text{ mm}$ a předehřev vzorku na teplotu $350 \text{ }^\circ\text{C}$.

Přetavením HVOF povlaku došlo ke snížení povrchové tvrdosti a mikrotvrdosti povlaku. Pokles je vyšší pro plně přetavený povlak. Tvrdost laserově povlakovaného Stellite se nachází

mezi tvrdostí částečně a plně přetaveného povlaku. Přetavením došlo sice k poklesu tvrdosti, ale zároveň k nárůstu modulu pružnosti [43]. Pokles tvrdosti přetavením je částečně dán změnou fázového složení. Uspořádání kobaltu s hexagonální mřížkou s těsným uspořádáním (hcp) má vyšší tvrdost a menší houževnatost než uspořádání s kubickou plošně středěnou mřížkou (fcc) [43]. Po nástřiku metodou HVOF vzniká částečně hcp, poměr fcc k hcp v HVOF povlaku je 70/30. Následným přetavením se vrací původní fcc struktura. Dále je mikrotvrdost ovlivněna velikostí dendritů, které při přetavení rostou. V neposlední řadě je pokles tvrdosti způsoben změnou zbytkového napětí, ke kterému při přetavení dojde. V HVOF nástřiku je zbytkové tlakové napětí [1], přetavením dojde k jeho vymizení a díky tuhnutí taveniny se objeví tahové napětí. Zbytkové tahové napětí se též ze stejného důvodu objevuje v povlacích vytvořených metodou laserového povlakování [44].

U povlaků Stellitu byl dále porovnáván koeficient kluzného opotřebení a koeficient tření. Nejnižší opotřebení bylo změřeno u částečně přetaveného povlaku. U plně přetaveného již pokles opotřebení oproti nepřetavenému HVOF není tak značný. Laserově povlakovaný Stelit se projevil nejvyšším opotřebením. Pokles opotřebení u přetavených povlaků je způsoben zvýšením kohezních sil – již nedochází k vylamování jednotlivých splatů. To, že pro plně přetavený povlak není pokles v opotřebení tak výrazný, je dáno tím, že blíže k povrchu vyplavaly částice korundu, které se opotřebením uvolní a dále působí jako abrazivní částice.

2.2. Charakterizace tepelných procesů laserového zpracování povrchů

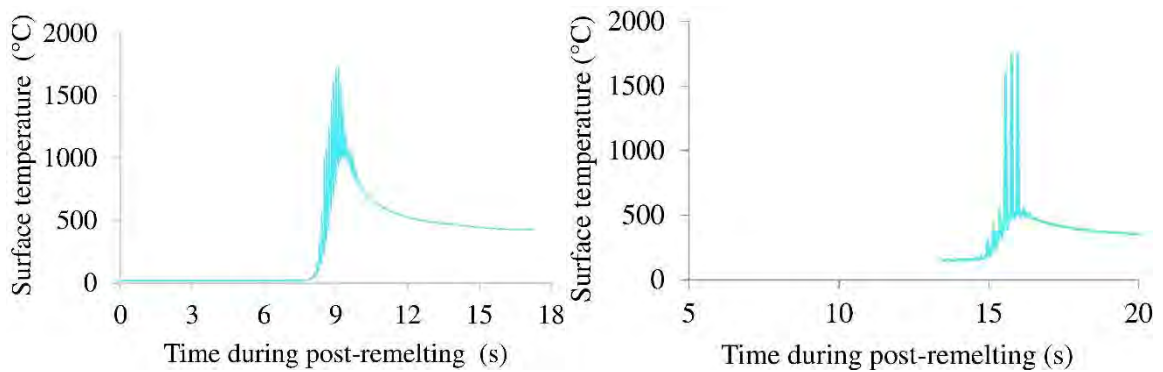
Charakterizace laserového procesu se provádí za účelem sběru informací vedoucích k jeho porozumění. Využívá metod měření i počítačového modelování. Jejich využití může vést ke stanovení závislosti výsledků na vstupních parametrech a k optimalizaci daného procesu. Měření procesu lze také využít k řízení celé technologie laserového přetavování s pozitivním vlivem na kvalitu a především opakovatelnost procesu.

Konkrétně pro proces laserového přetavení povlaků, mnoho studií se zabývá modelováním tohoto procesu. Například Lei a kolektiv [45] prezentují model pro numerický výpočet povrchové teploty a tvaru tavné lázně pro laserové přetavení objemové nerezové oceli. Autoři zohledňují především vliv proudění v tavenině vlivem Marangoniho efektu, který je

důsledkem gradientu povrchového napětí, které je přímo závislé na povrchové teplotě. Dále zohledňují vypařování z povrchu tavné lázně. Numerický model bohužel není porovnán s experimentem.

Ve studii [18] je popsán model pro laserové přetavení keramiky. Pomocí modelu je analyzováno rozložení teploty během přetavení a především rozložení tepelně indukovaného zbytkového napětí, které má velký vliv na vznik prasklin v přetaveném povrchu. Výsledky modelu jsou pak porovnány se vzniklou sítí prasklin po laserovém přetavení vzorku odpovídajícími parametry. Další příklady modelování procesu laserového tavení lze nalézt například ve studiích [46, 47]. V obou případech je model použit k výpočtu teplotního pole a zbytkového napětí, případně k dalším analýzám. Výsledek výpočtu je porovnán s experimentem, ve kterém byly pomocí mikroskopie analyzovány rozměry laserem přetavených oblastí.

Model laserového přetavení povlaku NiCrBSi vytvořeného metodou žárového nástřiku je popsán ve studii [48]. Pomocí modelu je analyzováno rozložení teploty během přetavení, zbytkové napětí a dále rozměry tavné lázně, tj. hloubka a šířka přetavené stopy v závislosti na parametrech přetavení. Vypočtené rozměry jsou následně porovnány se skutečnou dosaženou hloubkou a šířkou přetavení. Ve studii je uveden vypočtený průběh teploty v bodě uprostřed přetavované trajektorie. Autoři uvádějí, že vypočtený průběh teploty byl ověřen měřením s použitím infračervené (IR) kamery v rozsahu teplot 300 – 1500 °C. Dále je uvedeno, že vypočtený průběh teploty je blízký tomu spočtenému a že naměřená maximální teplota 1740 °C se též shoduje s vypočtenou. Spočtený a změřený průběh teploty je ukázán na Obr. 2.7. O provedeném měření však nejsou ve studii uvedeny další podrobnosti, ani není nijak vysvětlen nesoulad uvedeného rozsahu měření a změřené maximální teploty.



Obr. 2.7: Průběh teploty během přetavení povlaku NiCrBSi, vypočtená teplota (vlevo), naměřená teplota (vpravo) [48]

V publikacích zabývajících se výzkumem přetavování povlaků však není většinou používáno přímé měření tepelných procesů. Dále je proto čerpáno ze studií zabývajících se měřením laserových procesů principiálně podobných laserovému přetavení povlaků. Bezkontaktní optické měření je například často využito k analýze a kontrole procesu laserového kalení či laserového povlakování. Santhanakrishnan a kol. [49] ukazují použití kombinace dvoupásmového pyrometru a infračervené kamery k měření procesu laserového kalení. Výsledné tvrdosti a hloubky prokalení dávají do vztahu s naměřenými teplotami a na základě toho vytvářejí model pro další konfiguraci procesu. Podobně v publikaci [50] popisují použití pyrometru k měření teploty během laserového kalení a využití dat pro zpětnovazební řízení parametrů procesu. Dále je popsáno použití infračervené kamery při laserovém kalení ve studii [51]. Autoři popisují vliv úprav optických vlastností povrchu na výslednou absorpci laserového záření během kalení. Měřena je dosažená teplota během kalení a ta je úzce spojena s dosaženou tvrdostí a hloubkou prokalení.

Podobná měření se využívají i v technologii laserového povlakování. V publikaci [52] je popsáno použití vícepásmového pyrometru a IR kamery pro vyhodnocení teploty v tavné lázni v závislosti na procesních parametrech. Využití pyrometru a IR kamery pro stanovení teplot v tavné lázni během laserového povlakování je dále popsáno ve studiích [53, 54]

Bezkontaktní optické metody měření se využívají i při procesu selektivního laserového tavení (SLM – Selective Laser Melting), což je proces vytváření dílů tavením prášku laserem. Krauss [55] popisuje měření tohoto procesu použitím bolometrické infračervené kamery. Z výsledků měření je počítána tepelná vodivost a porovnávána s numerickým modelem. Měření má sloužit k detekci a předcházení vad ve výrobku. Podobně Chivel [56] popisuje měření tohoto

procesu pomocí CCD kamery a dvoupásmového vysokofrekvenčního pyrometru. Měřením procesu využitím různých detektorů se zabývá celá řada dalších publikací [55, 57–61].

2.2.1. Metody charakterizace tepelných procesů

Matematické modelování

K analýze termomechanického procesu probíhajícího v povlaku při jeho tepelném zpracování je možné použít metody matematického modelování. Matematický model je popis procesu soustavou matematických vztahů. Model termomechanického procesu v soustavě povlak-substrát se skládá se základních rovnic pro přenos tepla a vznik tepelné napjatosti pro vícevrstvé struktury, dále doplněný o okrajové a počáteční podmínky popisující především absorpci laserového záření jako povrchový tepelný tok [62]. Transformací těchto rovnic do tvaru, který lze realizovat na počítači vzniká počítačový model [63].

Pro získání adekvátních výsledků pomocí modelu je nutné znát termomechanické vlastnosti modelovaného materiálu, jako jsou tepelná vodivost, tepelná difuzivita, měrná tepelná kapacita, tepelná roztažnost, teploty fázových transformací a měrná skupenská tepla. Tyto vlastnosti jsou závislé na teplotě a mohou být pro povlaky vytvářené žárovým nástřikem nehomogenní [62]. Pro správné stanovení okrajových podmínek modelu je dále nutné znát optické vlastnosti povrchu, jako je emisivita a pohltivost laserového záření dané vlnové délky. Tyto veličiny jsou závislé na stavu povrchu a mohou být dále ovlivněny změnami při samotném procesu, například tvorbou oxidů při tepelném procesu.

Kontaktní způsoby měření

Při kontaktním měření je teplotní čidlo v přímém kontaktu s měřeným materiálem. Pro kontaktní měření teplot se nejčastěji využívají termoelektrické články – termočlánky. Existují různé typy termočlánků dle teplotních rozsahů, které umožňují měřit a dále podle typu prostředí, ve kterém je lze použít. Při měření komplexnějšího tepelného procesu v materiálu je nutné navrhnout vhodná měřicí místa a následně připravit vzorek na měření – upevnit termočlánky na požadovaná místa. Při měření teploty v různé hloubce se tak musí vzorek do požadované hloubky navrtat [62, 64].

Mezi nevýhody kontaktního měření patří časová náročnost přípravy vzorku. Z důvodu náročné přípravy někdy není možné prováděné měření libovolně opakovat. Další nevýhoda

je, že nelze měřit teplotu přímo v místě interakce laserového záření s povrchem materiálu, neboť by mohlo dojít k poškození termočlánku.

Výhoda kontaktního měření je ta, že není závislé na optických vlastnostech měřeného materiálu. Kontaktní měření termočlánkem se tak často používá pro doplnění bezkontaktního měření pro jeho kalibraci a výpočet neznámé emisivity povrchu [62, 65].

Bezkontaktní metody měření

Při bezkontaktním měření tepelného procesu se nejčastěji snímá infračervené záření vycházející z měřeného povrchu. Při měření laserového procesu lze využít i jevů, které se objevují při interakci laserového paprsku s materiálem. Jedná se o akustické, elektrické, optické či tepelné jevy a dle toho se dělí i metody jejich záznamu. Často se snímá například odražené laserové záření, záření plazmatu nad povrchem a také tepelné záření [66].

Pro měření tepelných jevů se obvykle využívají optické metody. Tyto metody lze dále dělit na aktivní a pasivní, dle využití dodatečného osvětlení. Pasivní se pak dále dělí na odrazivé či emisní [67].

Optické metody měření využívají různé detekční systémy. Fotodiody lze využít například pro měření intenzity záření [57]. CCD a CMOS kamery jsou použitelné pro snímání viditelné části spektra či v případě použití vhodných filtrů pro snímání blízkého infračerveného záření. Lze je použít například pro měření velikosti tavné lázně při laserovém tavení [57, 58]. Pyrometry se používají pro bodové měření teploty. Snímají infračervené záření v jednom, dvou či více spektrálních pásmech. Používají se například pro měření teploty při laserového ohřevu či tavení [49, 59]. Velmi často se používají speciální termovizní kamery s detektory a optikou uzpůsobenou pro záznam infračerveného záření.

Pro kvantitativní měření bezkontaktními optickými metodami je nutná přesná znalost optických vlastností měřeného povrchu, především jeho emisivity.

2.2.2. Měření infračervenou kamerou

Infračervená kamera (IR kamera, termovizní kamera) je zařízení, které slouží k analýzám v infračervené oblasti elektromagnetického záření. U těchto kamer je výstupní signál detektoru přímo úměrný intenzitě snímaného záření. Protože senzory nerozlišují vlnovou délku záření,

je zaznamenaný obraz jednobarevný. Záznamy z infračervené kamery se tak obvykle zobrazují v pseudobarevné podobě, jednotlivým barevným odstínům je přiřazena teplota a součástí obrazu je pak barevná teplotní stupnice.

Princip infračervené kamery

Existují dva základní typy zobrazovacích systémů [65, 68, 69]:

- systémy s opticko-mechanickým rozkladem obrazu,
- systémy s maticovým detektorem.

U kamer s opticko-mechanickým rozkladem obrazu dochází k postupnému snímání (skenování) zorného pole pomocí pohyblivé optické soustavy. Ta postupně přivádí záření ze všech míst zorného pole na detekční část, která může být tvořena jednotlivým bodovým detektorem případně malou mozaikou detektorů.

U druhého typu je celá snímaná oblast zaostřena na detektor, který je tvořen velkou maticí elementárních detektorů. Každému elementárnímu detektoru odpovídá jeden pixel výsledného termogramu. Tento typ detektoru se označuje FPA (Focal Plane Arrays).

Infračervené kamery se skládají z optické, detektorové a mikroprocesorové části. Konkrétní uspořádání se liší podle daného typu kamery [65, 68, 69].

Optická část – slouží k zaostření IR záření na detektor.

Objektiv je složen ze soustavy čoček a případně dalších optických členů, které jsou většinou vytvořeny z křemíku či germania. Objektiv musí být konstruován tak, aby eliminoval optické vady, jako například aberaci.

Detektorová část – převádí vstupní záření na elektrický signál. V infračervených kamerách se používají kvantové detektory nebo tepelné detektory.

Kvantové detektory využívají fotoelektrický jev, kdy zachycený foton generuje pár elektron-díra a mění se tak vodivost detektoru. Tyto detektory se dále dělí podle typu vodiče na fotorezistory a fotodiody. Často se používají tyto kvantové FPA detektory: HgCdTe, InSb, QWIP (Quantum Well Infrared Photodetector), PtSi, InGaAs [70]. Oblast detektoru bývá chlazená, například kapalným dusíkem.

Tepelné detektory bývají sestaveny tak, aby měly vlastnosti černého tělesa. Při absorpci záření dochází k ohřátí citlivé části detektoru a pohlcená energie je následně změřena nepřímo pomocí snímače teploty. Tepelné detektory se dále dělí na bolometrické, termoelektrické a pyroelektrické.

U bolometrických detektorů se na absorpční vrstvě senzoru pohlcuje záření, ohřívá se teplotně citlivý povrch a teplo se rozvádí do nosníku. Na spodní straně nosníku jsou odporové dráhy, jejichž odpor je závislý na teplotě. Vzorkovací frekvence snímání detektoru je tak ovlivněna časovou konstantou – dobou za kterou dojde k dosažení termodynamické rovnováhy detektoru [71, 72]. Běžné bolometrické detektory mají velkou časovou konstantu. Snaha o její snížení vedla k vývoji mikrobolometrických detektorů, kde je snížena tepelná kapacita absorpční vrstvy. Mikrobolometrické detektory bývají maticové – složené z velkého množství jednotlivých detektorů složených do integrovaného obvodu.

Mikroprocesorová část – převádí signál detektoru na teplotu, vytváří obraz a umožňuje jeho zpracování.

Důležitý je počet a typ datových výstupů. Většina IR kamer má dva výstupy – video výstup určený pro vizualizaci a digitální výstup pro záznam a kvantitativní měření. Další důležitý parametr je rozsah analogově digitálního převodníku. Rozsah ADC (Analog to Digital Converter) určuje počet úrovní digitálního čísla výstupu a tím ovlivňuje citlivost kamery. Běžné hodnoty jsou 14 bitů nebo 16 bitů [65].

Zpracování signálu

Výstupní signál kamery, napětí $V(t)$ je úměrné celkové hodnotě intenzity dopadajícího záření M_{tot} , odezvě detektoru R_D a konstantě k [73]:

$$V(t) = k \cdot R_D \cdot M_{tot}. \quad (2.1)$$

Konstanta k je definována pomocí parametrů kamery takto:

$$k = \frac{A_D \cdot \tau_{opt}}{4 \cdot F^2}, \quad (2.2)$$

kde τ_{opt} je propustnost optiky, A_D aktivní plocha detektoru, F je tzv. f-číslo optiky, tj. poměr ohniskové vzdálenosti čočky f_l a průměru vstupní apertury D .

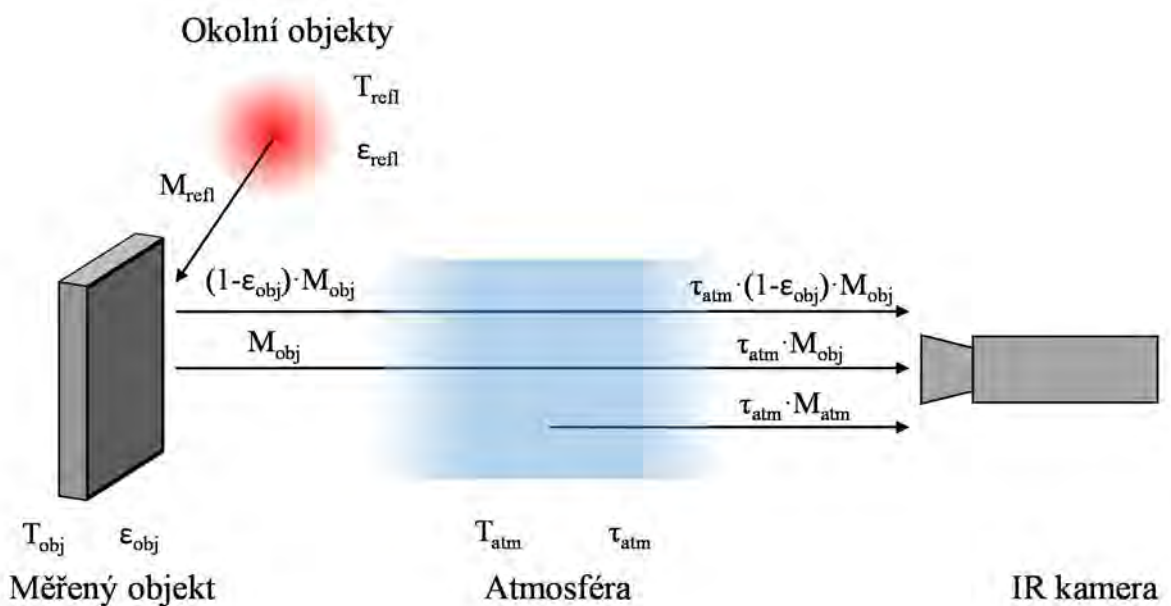
Procesy ovlivňující měření

Při měření s IR kamerou se celkové záření dopadající na detektor kamery (M_{tot}) skládá z následujících částí:

- záření měřeného objektu, zeslabené průchodem atmosféry $\tau_{atm} \cdot M_{obj}$, kde τ_{atm} je propustnost atmosféry a intenzita vyzařování objektu $M_{obj} = \varepsilon_{obj} \cdot M^{BB}(T_{obj})$, kde ε_{obj} je emisivita, T_{obj} teplota objektu a M^{BB} je intenzita vyzařování absolutně černého tělesa,
- záření okolních předmětů odražené od měřeného objektu $\tau_{atm} \cdot (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot M_{refl}$, kde $(1 - \varepsilon_{obj})$ je odrazivost povrchu měřeného předmětu a $M_{refl} = \varepsilon_{refl} \cdot M^{BB}(T_{refl})$ je intenzita vyzařování okolních předmětů,
- záření atmosféry $M_{atm} = \varepsilon_{atm} \cdot M^{BB}(T_{atm})$, kde emisivita atmosféry $\varepsilon_{atm} = (1 - \tau_{atm})$ a T_{atm} je teplota atmosféry.

Celková situace je znázorněna na Obr. 2.8. Výsledný vztah je popsán rovnicí [65, 74]:

$$M_{tot} = \tau_{atm} \cdot M_{obj} + \tau_{atm} \cdot (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot M_{refl} + M_{atm}. \quad (2.3)$$



Obr. 2.8: Schématické znázornění termografického měření

Pokud je měření prováděno přes propustné okno, které odděluje měřený objekt od kamery, je třeba dále zohlednit propustnost (τ_w) tohoto okna a jeho přímé vyzařování (M_w) [65, 75]. Tento popis je stále zjednodušeným popisem skutečných podmínek. Do vztahu není například započítán rozptyl slunečního světla v atmosféře nebo rozptýlené záření z intenzivního zdroje záření mimo zorný úhel kamery. Taková rušení se těžko kvantifikují, ve většině případů jsou však natolik malá, že je možné je zanedbat [65].

Celkovou zář L_{tot} přicházející k detektoru kamery tak lze vyjádřit podobně jako intenzitu vyzařování ze vztahu (2.3):

$$L_{tot} = \tau_{atm} \cdot \varepsilon_{obj} \cdot L^{BB}(T_{obj}) + \tau_{atm} \cdot (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot L^{BB}(T_{refl}) + (1 - \tau_{atm}) \cdot L^{BB}(T_{atm}), \quad (2.4)$$

kde zář $L^{BB}(T_{obj})$ je zář absolutně černého tělesa do jednotky prostorového úhlu dána Planckovým vyzařovacím zákonem:

$$L_{\lambda}^{BB}(\lambda, T) = \frac{2h \cdot c_0^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{h \cdot c_0}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1 \right)}, \quad (2.5)$$

kde h je Planckova konstanta, c_0 je rychlost světla ve vakuu a k Boltzmannova konstanta.

Vztah (2.4) je označován za základní rovnici termografie a je používán pro výpočet teploty měřeného objektu [65, 74].

Z výše uvedených vztahů vyplývají jevy, které nejvíce ovlivňují termografické měření:

- **Emisivita ε** – je definovaná jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa. Přímou ovlivňuje velikost vyzařovaného toku vydávaného měřeným tělesem a nepřímo ovlivňuje velikost toku odraženého od měřeného povrchu vyzařovaného okolními předměty [76].
- **Propustnost atmosféry** – je ovlivněna především relativní vlhkostí atmosféry, teplotou atmosféry a vzdáleností předmětu od kamery. Při měření do vzdálenosti 10 m nehraje propustnost atmosféry velkou roli. Její vliv roste při měření na větší vzdálenosti a při zvláštních podmínkách, jako je například vysoká vlhkost, přítomnost jiných plynů a podobně [73].
- **Efektivní teplota okolí předmětu, odražená zdánlivá teplota** – ovlivňuje nepřímo vyhodnocení teploty měřeného povrchu a to faktorem $(1 - \varepsilon_{obj})$, kterým je násoben

tepelný tok vydávaný předměty v okolí. Vliv záření od okolních předmětů je tím větší, čím větší je jejich teplota a čím menší je emisivita měřeného povrchu.

2.3. Shrnutí současného stavu problematiky

Povlaky vytvářené metodami žárových nástřiků mají široký rozsah použití v nejrůznějších odvětvích průmyslu. Jejich funkční vlastnosti jsou však omezené jejich strukturou, která je dána způsobem jejich vytváření. Ukazuje se, že přetavením těchto povlaků lze zvýšit jejich funkční vlastnosti. Úspěšně lze přetavit celou řadu povlaků. Porovnáním funkčních vlastností před a po přetavení, či porovnáním různých metod a variant přetavení se zabývá řada vědeckých publikací. Z těchto publikací vyplývá, že dosažení optimálního stupně přetavení je velmi závislé na použitých procesních parametrech. Například povlak Stellitu 6 přetavený pouze do poloviny tloušťky má značně vyšší odolnost proti opotřebení než plně přetavený či nepřetavený povlak. Množství vneseného tepla do povlaku také ovlivňuje zbytkové napětí v přetaveném povlaku, které souvisí s nebezpečím praskání povlaku.

Proces laserového přetavování je proto vhodné charakterizovat, aby bylo možné opakovaně dosáhnout žádaných výsledků. V několika studiích je představena možnost využití metod matematického modelování pro tuto aplikaci. Modely slouží k výpočtu teplotního pole, zbytkového napětí či rozměrů tavné lázně. V publikacích zabývajících se výzkumem přetavování povlaků většinou není metoda přímého měření teplot během procesu používána. Přitom pro principiálně podobné procesy, jako je například laserové kalení či povlakování, jsou metody měření teploty či rozměrů tavné lázně využívající prostředky bezkontaktního měření prezentovány. Z analýzy současného stavu tak vyplývá potenciální možnost vytvoření vhodné bezkontaktní metody pro výzkum procesů laserového přetavování povlaků.

Taková metoda charakterizace laserového přetavení by měla být snadno použitelná při změně materiálů či při změně geometrie přetavovaného vzorku, což je významné vzhledem k širokému spektru povlaků, které se laserem přetavují a také k rozmanitosti možných aplikací.

Kvůli tomu, že při modelování je nutné znát termomechanické vlastnosti materiálu, které jsou navíc u žárových nástřiků značně teplotně závislé a nemusí být vždy k dispozici pro konkrétní aplikaci, zdají se metody přímého měření jako univerzálnější pro diagnostiku procesu přetavení. Metody přímého měření se přitom jeví pro charakterizaci procesu přetavení jako

vhodnější při porovnání s metodami počítačového modelování. Jako vhodný nástroj pro takové měření připadá infračervená kamera, se kterou může být změřeno teplotní pole na celém povrchu přetavovaného povlaku. Úspěšné použití kvantitativní termografie pro tuto aplikaci však nebude jednoduché a to zejména s ohledem na změny emisivity v průběhu procesu přetavení povrchu materiálu.

3. Cíle disertační práce

Cíle disertační práce vyplývají z analýzy současného stavu problematiky laserového přetavování. Disertační práce se zabývá možností použití infračervené termografie pro charakterizaci procesu přetavování. Hlavním cílem práce je vytvoření vhodné bezkontaktní metody pro výzkum tepelných procesů probíhajících v povrchové vrstvě povlaku při použití výkonného kontinuálního laseru a určení hloubky protavení povlaku.

Jednotlivé dílčí cíle práce jsou definovány takto:

1. Navrhnout vhodné uspořádání metody založené na využití termovizních kamer pro výzkum tepelných procesů spojených s laserovým přetavováním povlaků a k sestavení metody využít dostupné technické vybavení pracoviště.
2. Navrhnout vhodné způsoby vyhodnocení naměřených dat pro určení teplotních charakteristik procesu přetavování a určení hloubky přetavení povlaku a tyto způsoby prakticky ověřit.
3. Provést experimenty laserového přetavení na vzorcích povlaků s použitím vyvinuté měřicí metody a analyzovat vztahy mezi technologickými parametry, charakteristikami procesu a výslednou hloubkou protavení povlaku.

4. Metody zpracování

Tato kapitola se věnuje popisu metod použitých k řešení disertační práce. Nejprve je popsána metoda přetavení povlaků a procesní parametry použité při experimentech. Následně jsou stručně popsány použité vzorky. Dále jsou představeny termovizní kamerové systémy, které byly při experimentech použity. Závěrečná část je pak věnována vývoji metody měření procesu přetavení a způsobům vyhodnocení naměřených dat.

4.1. Metoda laserového přetavení povlaků

4.1.1. Laserový systém

Pro přetavení povlaků je použit přímý diodový laser (HPDD – High Power Direct Diode) Highlight ISL-4000L od firmy Coherent. Laser září na vlnové délce 805 ± 10 nm. Laserové záření je tvořeno přímou transformací elektrické energie na světelnou v jednotlivých diodách. Diody jsou uspořádány celkem do 4 modulů, každý s výkonem cca 1 kW. Celkový zářivý výkon laseru je 4280 W. Jednotlivé moduly lze aktivovat nezávisle na sobě a tím řídit výkon laseru. Svazek z jednotlivých modulů se překrývá a při plném výkonu má rozměr 12×1 mm. Při nižším výkonu se částečně zmenšuje. Případně je možné použít čočku k rozostření svazku, výsledný rozměr svazku má pak rozměry 12×6 mm. Rozložení energie v kratší ose je dle Gaussova rozdělení, v delší ose pak konstantní [77]. Tento laserový zdroj může zářit v kontinuálním režimu či modulovaném s délkou pulsu od 1 ms. Pracovní vzdálenost, tedy vzdálenost mezi laserovou hlavou a zpracovávaným povrchem, je 90 mm.

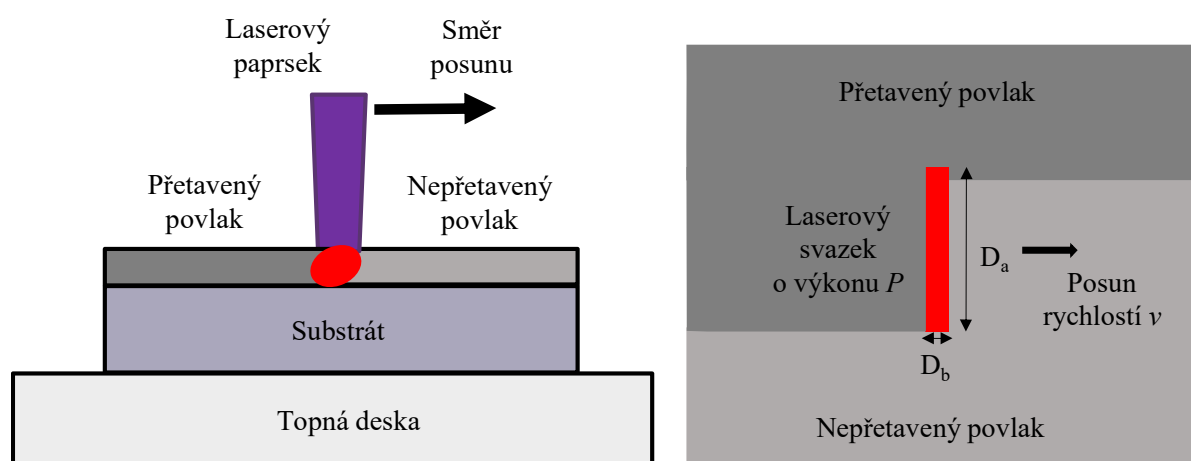


Obr. 4.1: HPDD laser Coherent Highlight ISL-4000L na robotu Fanuc M-710iC

Laserová hlava je připojena na rameni průmyslového, šesti-osého, robota Fanuc M-710iC (viz Obr. 4.1), umožňujícímu plynulý pohyb všemi směry nad zpracovávanou součástí. Systém je dále doplněn o rotační polohovadlo. Trajektorie, rychlost zpracování a výkon laseru jsou řízeny kontrolní jednotkou robota. Díky velkému rozměru svazku a vysokému výkonu je systém vhodný především na povrchové úpravy materiálu, jako je kalení nebo přetavování. Pro předehřev zpracovávaného vzorku je použita topná titanová deska PZ 28-D s regulací teploty.

4.1.2. Způsob přetavování

Absorpcí laserového záření na povrchu vzorku dochází v tomto místě k rychlému ohřevu a natavení povrchové vrstvy. Přesunem svazku do jiného místa pak dojde k odvodu tepla do substrátu a ke znovu ztuhnutí roztavené vrstvy. Při jednom přejezdu je přetavena jedna stopa o šířce odpovídající šířce laserového svazku. Přetavení větší plochy je docíleno napojováním stop s překryvem 2 mm. Schéma procesu je znázorněno na Obr. 4.2.



Obr. 4.2: Schéma procesu přetavení povlaku

Hlavní parametry procesu jsou následující:

- výkon laseru P [W],
- procesní rychlost v [cm/min],
- rozměr laserového svazku $D_a \times D_b$ [mm \times mm],
- intenzita ozáření E [W/mm²],

- dávka ozáření H [J/mm^2], celková energie dodaná na plochu; Pro přejezd povrchu diodovým laserem je spočtena dle vztahu:

$$H = \frac{P}{D_a \cdot v} [J \cdot mm^2]. \quad (4.1)$$

Hlavní vliv na výsledek přetavení má použitý výkon a s ním související intenzita ozáření. Při vysokém výkonu lze použít vysokou procesní rychlost a dosáhnout přetavení za celkově nižší dávky ozáření. Přetavený povlak však většinou obsahuje velké množství prasklin, pórů a dalších vad. Pro dosažení požadovaného přetavení bez vad je vhodnější použít kombinaci menšího výkonu a nižší procesní rychlosti. Dále pro snížení či eliminaci množství vad v přetaveném povlaku je vhodné použít předehřev vzorku.

4.1.3. Použité procesní parametry

Pro experimenty provedené v rámci této práce byly použity již dříve optimalizované parametry pro dosažení různé hloubky protavení povlaku Stellitu za použití standartního vzorku [43]. Při nejnižší dávce ozáření dojde k přetavení tenčí povrchové vrstvy povlaku, při nejvyšší dávce ozáření dojde k protavení na substrát a vytvoření metalurgické vazby. Parametry přetavení jsou uvedeny v Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Parametry přetavení pro dosažení různé hloubky protavení

Parametry č.	Výkon P [W]	Rychlost v [cm/min]	Dávka ozáření H [J/mm^2]	Intenzita ozáření E [W/mm^2]
1	1070	40	13,4	59,2
2		35	15,3	
3		30	17,8	
4		25	21,4	
5		17	31,5	
6		12,5	42,8	

Při experimentech bylo použito přetavení jedné stopy danými parametry – proveden jeden přejezd. Použitá teplota předehřevu byla 350 °C.

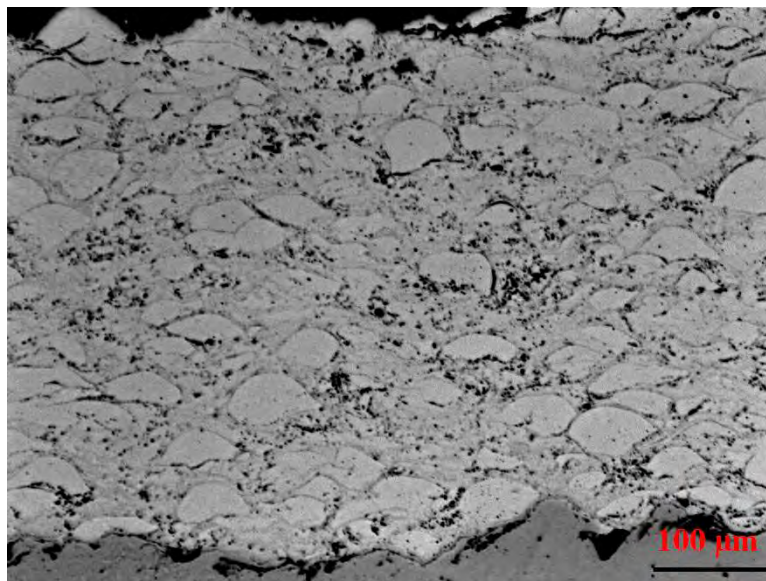
4.2. Experimentální vzorky

Přetavování bylo prováděno na vzorcích s povlakem Stellitu 6. Povlaky byly nanášeny žárovým nástřikem technologií HVOF na zařízení HP/HVOF TAFA JP5000 ve VZÚ Plzeň. Jako substrát byla použita ocel ČSN EN 10083-2; C45. Pro vytvoření povlaku byl použit prášek s označením M-484.33 od firmy FST s velikostí částic 20 – 53 μm . Jeho chemické složení je uvedeno v Tab. 4.2.

Tab. 4.2: Chemické složení prášku Stellite 6 (M-484.33) [78]

Chemické složení [%hm]				
Co	Cr	W	C	Si
zbytek	28	5	1,2	1

Struktura povlaku na příčném řezu vzorkem před laserovým zpracováním je uvedena na Obr. 4.3. Udávaný teplotní rozsah tavení Stellitu 6 je 1285 – 1410 $^{\circ}\text{C}$ [79, 80].



Obr. 4.3: Mikrostruktura HVOF povlaku Stellitu 6 před přetavením.

4.2.1. Označení a rozměry vzorků

Označení vzorků používaných při experimentech a jejich rozměry jsou uvedeny v Tab. 4.3. Označení S_x/P_y udává tloušťku substrátu x mm a povlaku y mm. Vzorky značené A (S10/P0,4) jsou použity při vývoji metody měření procesu přetavení. Vzorky B (S20/P0,4) a C (S20/P1) jsou následně použity v další fázi experimentu, který má za cíl ověřit, zda je metoda vhodná pro měření s různou tloušťkou povlaku a substrátu.

Tab. 4.3: Rozměry a označení vzorků

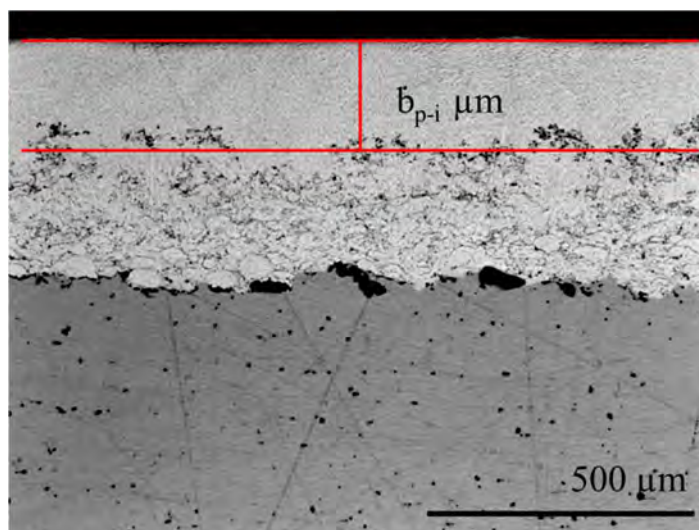
Vzorek	A (S10/P0,4)	B (S20/P0,4)	C (S20/P1)
Tloušťka substrátu [mm]	10	20	20
Tloušťka povlaku [mm]	0,4	0,4	1
Rozměry [mm × mm]	200 × 100	100 × 100	100 × 100

V tabulce je uvedena přibližná tloušťka povlaku. Přesná tloušťka je stanovena až po experimentu souběžně s měřením hloubky protavení.

4.2.2. Vyhodnocení hloubky protavení

Hloubka protavení povlaků, dále značená b_p , byla měřena na metalografickém výbrusu příčného řezu povlakem. Pro měření byl využit optický digitální 3D mikroskop Hirox. Za hloubku protavení je považována hloubka, do které došlo k přeměně původní struktury žárového nástřiku ve smyslu spojení jednotlivých splatek. Postup vyhodnocení je následující. Byla změřena střední hloubka protavení určená na úseku cca 1,5 mm, jak je naznačeno na Obr. 4.4, na 5 místech rovnoměrně rozdělených napříč přetavenou stopou. Nebyly uvažovány 1 mm okraje stopy. Výsledná hloubka protavení je spočtena jako aritmetický průměr následovně:

$$b_p = \frac{\sum_i b_{p-i}}{i} \text{ } [\mu\text{m}]. \quad (4.2)$$



Obr. 4.4: Měření hloubky protavení přetaveného povlaku

Stejným postupem byla měřena celková tloušťka povlaku, tj. od povrchu na rozhraní se substrátem.

4.3. Použité měřicí systémy

V této podkapitole je uveden popis termovizních kamerových systémů použitých k vývoji nových metod měření procesu přetavení. Nejprve byly využity dvě kamery měřící v LWIR (Long wavelength infrared) pásmu vlnových délek a následovně byla využita kamera měřící v NIR (Near infrared) pásmu vlnových délek.

4.3.1. Termovizní kamery pracující v pásmu LWIR

FLIR A615

Termovizní kamera FLIR A615 je určena pro průmyslové a vědecké aplikace. Kamera je vybavena nechlazeným mikrobolometrickým FPA detektorem s rozlišením 640×480 pixelů. Snímá dopadající infračervené záření v rozsahu vlnových délek $7,5 - 14 \mu\text{m}$, tj. v oblasti LWIR – pásmo dlouhých vlnových délek. Umožňuje měření teplot až do $2000 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro datovou komunikaci je kamera vybavena Gigabitovým Ethernetovým rozhraním a mini USB vstupem. Snímaný obraz lze automaticky zaostřit a ukládat do řídicího počítače po jednotlivých snímcích nebo jako sekvenci snímků s frekvencí až 50 Hz při plném rozlišení, při použití funkce windowing lze ukládat snímky o rozlišení 640×240 pixelů s frekvencí 100 Hz nebo 640×120 pixelů s frekvencí 200 Hz. Z měřicího počítače je kamera plně ovladatelná, ovládat ji lze i digitálními vstupy například z manipulačního zařízení [81]. Kamera je zobrazena na Obr. 4.5, její parametry a použitá nastavení jsou uvedeny v Tab. 4.4.



Obr. 4.5: Termovizní kamera FLIR A615 [81]

Jenoptik VarioCAM hr head

VarioCAM hr head od firmy Jenoptik je termovizní kamera určená též pro průmyslové i vědecké aplikace. Kamera disponuje nechlazeným mikrobolometrickým FPA detektorem s rozlišením 640×480 pixelů. Snímá dopadající infračervené záření v LWIR rozsahu vlnových délek. Umožňuje měření teplot od -40 do 2000 °C. Pro datovou komunikaci je kamera vybavena Gigabitovým Ethernetovým nebo FireWire rozhraním. Kromě přímého ukládání snímaných dat do počítače umožňuje i jejich ukládání na paměťovou kartu. Snímaný obraz lze ukládat po jednotlivých snímcích nebo jako sekvenci snímků s frekvencí 50/60 Hz při plném rozlišení. Má stejné možnosti řízení jako předchozí kamera [82]. Kamera je zobrazena na Obr. 4.6, její parametry a použitá nastavení v Tab. 4.4.



Obr. 4.6: Termovizní kamera Jenoptik VarioCAM hr head [82]

Tab. 4.4: Parametry a použitá nastavení kamer FLIR A615 a Jenoptik VarioCAM hr head

	FLIR A615	VarioCAM hr head
detektor	FPA nechlazený mikrobolometrický	
rozlišení	640×480 px	
pásmo vlnových délek	$7,5 - 14$ μm	
teplotní rozsah	$-40 - 2000$ °C	
použitý podrozsah	$300 - 2000$ °C	$400 - 2000$ °C
teplotní citlivost	$<0,05$ K	
přesnost měření	± 2 °C nebo 2 %	$\pm 1,5$ °C nebo 1,5 % (2 %)
převodník	16 bitový A/D převodník	
použitá vzorkovací frekvence	12,5 Hz	10 Hz
použitý objektiv	$f = 24,6$ mm, $25^\circ \times 19^\circ$ FOV	$f = 30$ mm, $32^\circ \times 25^\circ$ FOV

4.3.2. Termovizní kamera pracující v pásmu NIR

LumaSense MIKRON MCS640

Krátkovlnná termovizní kamera MIKRON MCS640 od firmy LumaSense je určena pro vysokoteplotní vědecké a průmyslové aplikace. Při konfiguraci s I5 filtrem kamera snímá dopadající infračervené záření v rozsahu vlnových délek 780 – 1080 nm. Detektor kamery je nechlazený křemíkový s rozlišením 640 × 480 pixelů. Kamera umožňuje měření teplot od 800 do 3000 °C. Pro datovou komunikaci je vybavena gigabitovým ethernetovým rozhraním. Snímaný obraz lze manuálně zaostřit a ukládat do řídicího počítače po jednotlivých snímcích nebo jako sekvenci snímků s frekvencí až 60 Hz při plném rozlišení. Z měřicího počítače je kamera plně ovladatelná a ovládat ji lze i digitálními vstupy například z manipulačního zařízení. Zorné pole kamery lze upravit výměnou objektivů, například použitím širokoúhlého či teleskopického objektivu [83]. Kamera je zobrazena na Obr. 4.7.



Obr. 4.7: Termovizní kamera LumaSense MIKRON MCS640 [83]

Pro měření procesu přetavení je kamera vybavena teleskopickým objektivem s ohniskovou vzdáleností $f = 75$ mm se zorným úhlem $3,5^\circ \times 2,6^\circ$. Umožňuje měření objektů v minimální vzdálenosti 0,5 m s velikostí pixelu < 50 μm při rozměru snímané oblasti 31×23 mm.

Vlastnosti kamery a použitá nastavení během měření jsou shrnuty v Tab. 4.5.

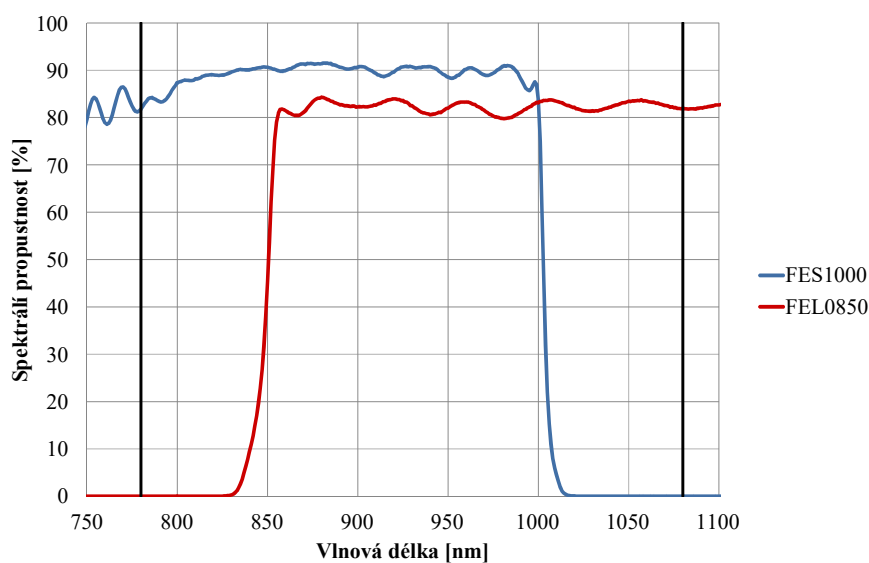
Tab. 4.5: Vlastnosti a použitá nastavení kamery LumaSense MIKRON MCS640

Mikron MCS640 + I5 Filtr	
detektor	křemíkový, nechlazený
rozišení	640 × 480 px
pásmo vlnových délek	780 – 1080 nm
s použitím filtrů	850 – 1000 nm
teplotní rozsah	800 – 3000°C
použitý podrozsah	800 – 1600°C
teplotní citlivost	1 ° na 600 °C
přesnost měření	± 0,5 %
použitá vzorkovací frekvence	10 Hz
použitý objektiv	f = 75 mm, 3,5° × 2,6° FOV

Použití filtrů a kalibrace kamery

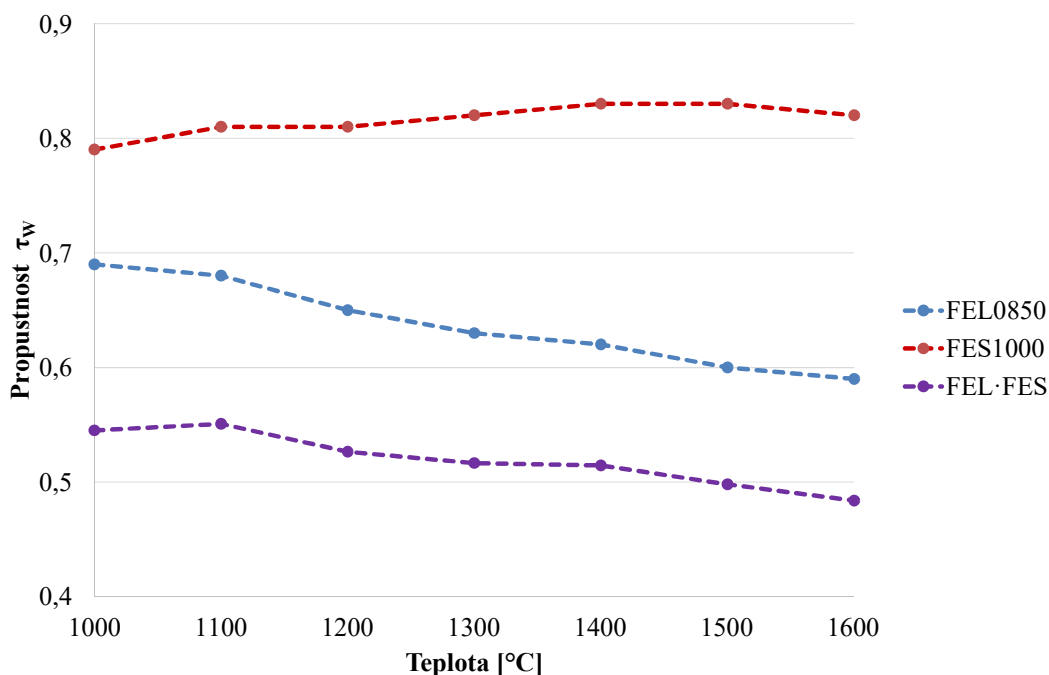
Měřicí rozsah NIR kamery zahrnuje vlnovou délku HPDD laseru použitého pro přetavování ($\lambda = 805 \text{ nm}$). Odražené laserové záření snímané kamerou by mohlo ovlivnit měření či dokonce poškodit kameru. Z tohoto důvodu je vhodné použít filtry zabráňující průchodu odraženého laserového záření do objektivu kamery.

Při měření procesu přetavování byly použity dva filtry od firmy Thorlabs: FEL0850 propouští vlnové délky větší než 850 nm a FES1000 propouští vlnové délky menší než 1000 nm. Na Obr. 4.8 je ukázána propustnost filtrů v závislosti na vlnové délce, spolu s vyznačením rozsahu vlnových délek snímaných kamerou.



Obr. 4.8: Spektrální propustnost filtrů použitých při měření s kamerou MIKRON MCS640

Při použití filtrů tak na detektor kamery dopadá pouze záření v rozsahu od 850 do 1000 nm a ve snížené intenzitě. Propustnost filtrů lze při měření s kamerou nastavit jako propustnost okna, která se však aplikuje na celý měřicí rozsah kamery jako konstanta. Tato efektivní propustnost okna τ_w byla stanovena kalibračním měřením za použití vysokoteplotního černého tělesa Landcal P1600B2 firmy Land v teplotním rozsahu od 1000 do 1600 °C. Výsledná propustnost τ_w pro jednotlivé filtry a jejich kombinaci v závislosti na teplotě je uvedena na Obr. 4.9.



Obr. 4.9: Propustnost použitých filtrů v závislosti na teplotě

Z grafu je patrné, že propustnost τ_w je závislá na teplotě, což je důsledek spektrálního posunu maxima vyzařování (Wienův posunovací zákon). Nejmenší závislost na teplotě je při použití kombinace obou filtrů, to se propustnost pohybuje v rozsahu od 0,484 do 0,545. Propustnost filtrů je tak aproximována průměrnou hodnotou $\tau_w = 0,52$. Výhoda použití kombinace obou filtrů je, že stejná konfigurace může být použita pro měření procesů i s jinými lasery, které vyzařují na vlnové délce v tomto rozsahu, například pevnolátkové diskové lasery 1030 nm nebo vláknové lasery 1070 nm.

4.3.3. Analýza termogramů

K analýze naměřených termogramů byl využit software pro vyhodnocení termografických měření. K vyhodnocení dat z kamery FLIR A615 byl použit program IRControl, z kamery VarioCAM program IRBIS3 a k vyhodnocení dat z kamery MIKRON MCS 640 byl použit program LumaSpec RT. Dále byl k vyhodnocení používán univerzální software pro termovizní analýzu LabIR, vyvinutý na pracovišti Výzkumného centra – Nové technologie. Tyto programy umožňují z naměřených dat stanovit výslednou teplotu. Lze vyhodnotit teplotu například v zadaných bodech, liniích a plochách a exportovat časový průběh těchto teplot.

Teplota je stanovena z naměřených tepelných toků, zadané emisivity měřeného předmětu a případně dalších zadaných veličin, jako je teplota a emisivita okolních předmětů, propustnost okna či propustnost atmosféry. Výpočet vychází ze vztahů (2.4) a (2.5), výsledné rovnice jsou:

$$L_{obj}^{BB} = \frac{L_{tot} - \tau_{atm} \cdot (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot L_{refl}^{BB} - (1 - \tau_{atm}) \cdot L_{atm}^{BB}}{\tau_{atm} \cdot \varepsilon_{obj}}, \quad (4.3)$$

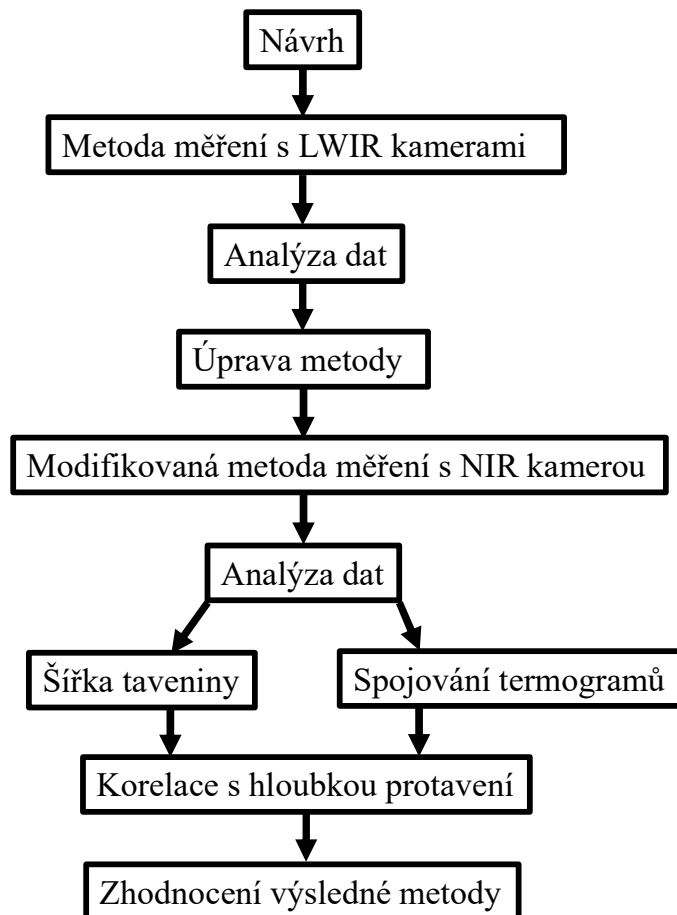
$$T_{obj}[\text{K}] = \frac{\frac{h \cdot c_0}{\lambda \cdot k}}{\ln\left(\frac{2hc_0^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{L_{obj}^{BB}} + 1\right)} = \frac{K_1}{\ln\left(\frac{K_2}{L_{obj}^{BB}} + 1\right)} \quad (4.4)$$

Konstanty označené K_1 a K_2 se spočtou dosazením Planckovy konstanty $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s, rychlosti světla ve vakuu $c_0 = 2,998 \cdot 10^8$ m/s, Boltzmannovy konstanty $k = 1,381 \cdot 10^{23}$ J/K a vlnové délky. Pro LWIR kamery se při výpočtu používá vlnová délka $\lambda = 10$ μm , pro NIR kameru LumaSense MIKRON MCS640 pak vlnová délka $\lambda = 1$ μm . V některých programech jsou navíc tyto konstanty dále modifikovány dle typu kamery či nastaveného měřicího rozsahu.

4.4. Vývoj metody charakterizace procesu přetavení

Postup vývoje metody pro měření procesu přetavení odrážel časovou dostupnost jednotlivých termovizních kamer. Schéma průběhů experimentů je znázorněno na Obr. 4.10. První návrh metody využíval v té době dostupné dvě LWIR kamery. Účelem experimentu bylo porovnat možnosti umístění kamer během měření, vyhodnotit naměřená data a zhodnotit, zda tento

způsob měření bude využitelný pro charakterizaci procesu přetavení. Případně na základě výsledků metodu měření modifikovat. Následně pak byla metoda měření upravena a využila se kamera měřící v NIR pásmu vlnových délek. Data z měření byla vyhodnocena a bylo analyzováno, který způsob měření a vyhodnocení je nejvhodnější pro určení hloubky protavení povlaku.



Obr. 4.10: Schéma postupu vývoje metody pro měření přetavení povlaků

4.4.1. Uspořádání experimentu

Cílem vyvíjené metody měření je detailně analyzovat proces laserového přetavení povlaku. V první řadě je cílem charakterizovat rozložení teploty v oblasti interakce laserového svazku s povlakem, tj. oblasti taveniny a nejbližšího okolí. Aby bylo jednoduše možné vyhodnocovat teploty v této oblasti během celého procesu, bylo by vhodné, aby se daná oblast na

termogramu jevila jako statická. To je možné zajistit tím, že termovizní kamera se během přetavování bude pohybovat souběžně s posunem laserového svazku po povrchu.

Neméně důležité je však snímat vývoj teploty ve větší vzdálenosti od místa interakce, dále také na celém povrchu vzorku nebo ve vybraných místech vzorku. Pro toto vyhodnocení je naopak nutné, aby celý vzorek byl na termogramu statický. Vzorek je umístěn během přetavení na statické topné desce. Kamera tak musí být umístěna na stativu tak, aby zorné pole kamery obsahovalo celý vzorek.

Na základě výše uvedených požadavků je zvoleno použití dvou kamer s následujícím umístěním:

1) Pohyblivá kamera

Je upevněná přímo k laserové hlavě a zaměřená na snímání oblasti taveniny.

V první verzi metody měření byla na tomto místě použita LWIR kamera FLIR A615. Teplotní rozsah měření byl zvolen 300 – 2000 °C, frekvence snímání 12,5 Hz. Oblast taveniny je však pouze výřezem z celého termogramu, celé zorné pole kamery s daným objektivem je větší.

V další fázi vývoje metody byla používána NIR kamera MIKRON MCS 640 s teleskopickým objektivem. Teplotní rozsah měření byl zvolen 800 – 1600 °C a frekvence snímání 10 Hz. Díky použitému teleobjektivu má záznam oblasti taveniny vysoké rozlišení.

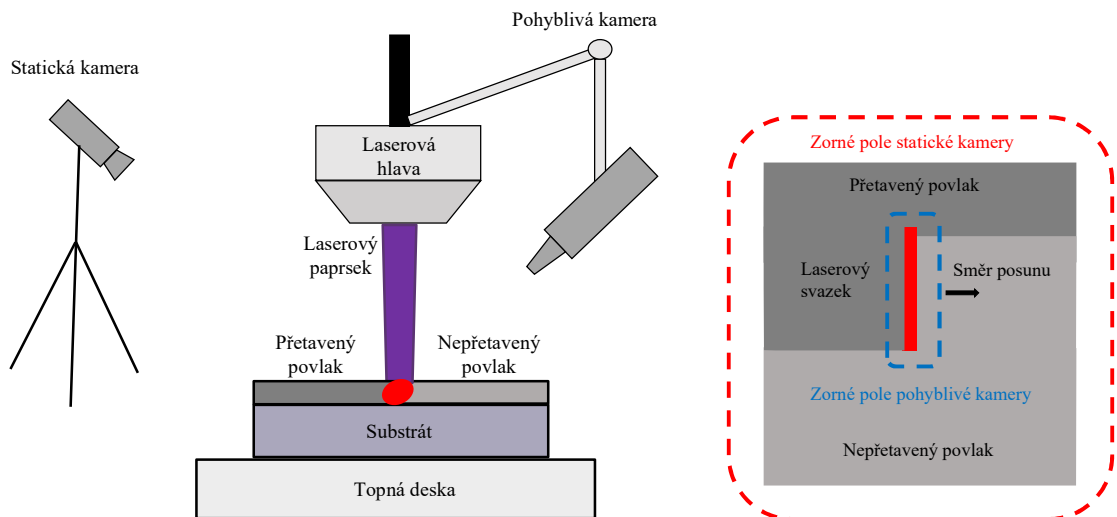
2) Statická kamera

Je umístěna na stativu a zaměřena na snímání celého vzorku.

V první verzi metody měření byla na tomto místě použita LWIR kamera Jenoptik VarioCAM hr head. Teplotní rozsah měření byl 400 – 2000 °C a frekvence snímání 10 Hz.

Ve druhé fázi experimentů byly na tomto místě použity LWIR kamery FLIR A615 a to vzhledem k možnosti zvolit měřicí podrozsah teplot od 300 do 2000 °C. Vzorkovací frekvence byla zvolena 6,25 Hz.

Celkové schéma uspořádání experimentu spolu se schematickým vyznačením zorného pole kamer je ukázáno na Obr. 4.11.



Obr. 4.11: Uspořádání experimentu měření procesu přetavení

Dle typu použitých kamer jsou jednotlivé varianty metody měření označeny následovně:

1) Metoda měření s LWIR kamerami

Díličními cíli této fáze experimentů bylo:

- zhodnocení možnosti použití LWIR typu kamer pro tuto aplikaci,
- ověření použitelnosti zvoleného umístění kamer,
- zhodnocení zvolených postupů vyhodnocení a potenciálu jednotlivých výsledků měření k určování hloubky protavení.

V experimentech byl použit vzorek A1 (S10/P0,4), parametry přetavení byly dle Tab. 4.1, kdy každými parametry byly přetaveny dvě stopy s překryvem 2 mm.

Pro vyhodnocení teplot je nutné stanovit emisivitu povlaku jak před přetavením, tak po přetavení jednotlivými parametry, protože stav povrchu se může měnit. Postup stanovení emisivity je popsán dále v samostatné podkapitole.

2) Modifikovaná metoda měření s NIR kamerou

Důvodem pro výměnu typu pohyblivé kamery z LWIR na NIR bylo zlepšení přesnosti určení výsledných teplot a zvýšení prostorového rozlišení charakterizace oblasti interakce laserového paprsku s povlakem. Měření v NIR rozsahu vlnových délek je méně závislé na emisivitě povrchu než při měření v LWIR a tak poskytuje vyšší přesnost měření [84–86].

Emisivita kovů a povlaků je vyšší v NIR než v LWIR a roste s teplotou [87]. Z těchto důvodů bylo pro měření s NIR kamerou zvoleno nastavení emisivity na 1.

NIR kamera je vybavena teleskopickým objektivem. To přináší možnost dosažení vyššího prostorového rozlišení a tudíž větších možností při vyhodnocení teplotního pole v oblasti interakce.

Cílem modifikované metody měření bylo:

- zhodnocení možnosti použití NIR kamery pro detailní analýzu oblasti taveniny,
- využití teplot stanovených pomocí NIR kamery k určení emisivity pro LWIR kamery,
- analýza vlivu rozměrů přetavovaných vzorků na dosaženou hloubku protavení,
- získání většího množství dat pro analýzu vztahů mezi hloubkou protavení a jednotlivými výsledky měření.

V těchto experimentech byly použity vzorky A (S10/P0,4), B (S20/P0,4), C (S20/P1). Parametry přetavení byly dle Tab. 4.1, kdy každými parametry byla přetavena jedna stopa.

4.4.2. Postup vyhodnocení naměřených dat z pohyblivé kamery

Cílem vyhodnocení měření z pohyblivé kamery je stanovení rozložení teplot v oblasti interakce laserového svazku s povlakem a jejího nejbližšího okolí. Postup vyhodnocení byl navržen tak, aby výsledkem bylo stanovení:

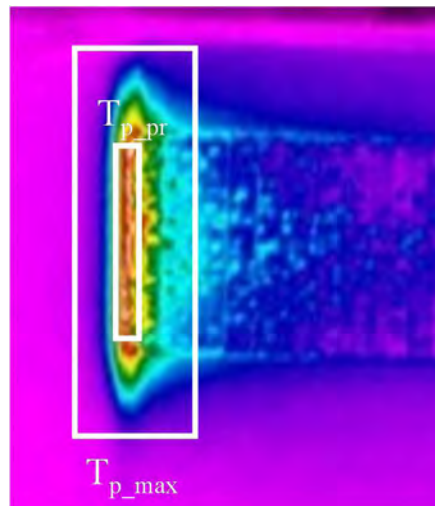
- průběhu teplot v oblasti taveniny v jednotlivých snímcích, tj. v jednom časovém okamžiku, nebo alespoň průměrných a maximálních teplot ve zvolené oblasti pro daný snímek $T(x, t = \text{konst})$,
- průměrných hodnot teplotních průběhů či teplot pro celý přejezd konstantními parametry.

Vzhledem k různým možnostem použitých kamer je postup vyhodnocení odlišný. Pro jednotlivé varianty byl postup následující:

1) LWIR kamera FLIR A615

Při použití této kamery bylo zvoleno vyhodnocení průměrné a maximální teploty v oblasti interakce laserového paprsku s povlakem. Ukázka termogramu spolu s vyznačenými oblastmi vyhodnocení je na Obr. 4.12. Stanovené teploty jsou označeny následovně:

- $T_{p_pr}(t)$ – průměrná teplota v přední části oblasti interakce laserového paprsku s povrchem, tj. oblasti taveniny,
- $T_{p_max}(t)$ – maximální teplota v celé oblasti interakce.

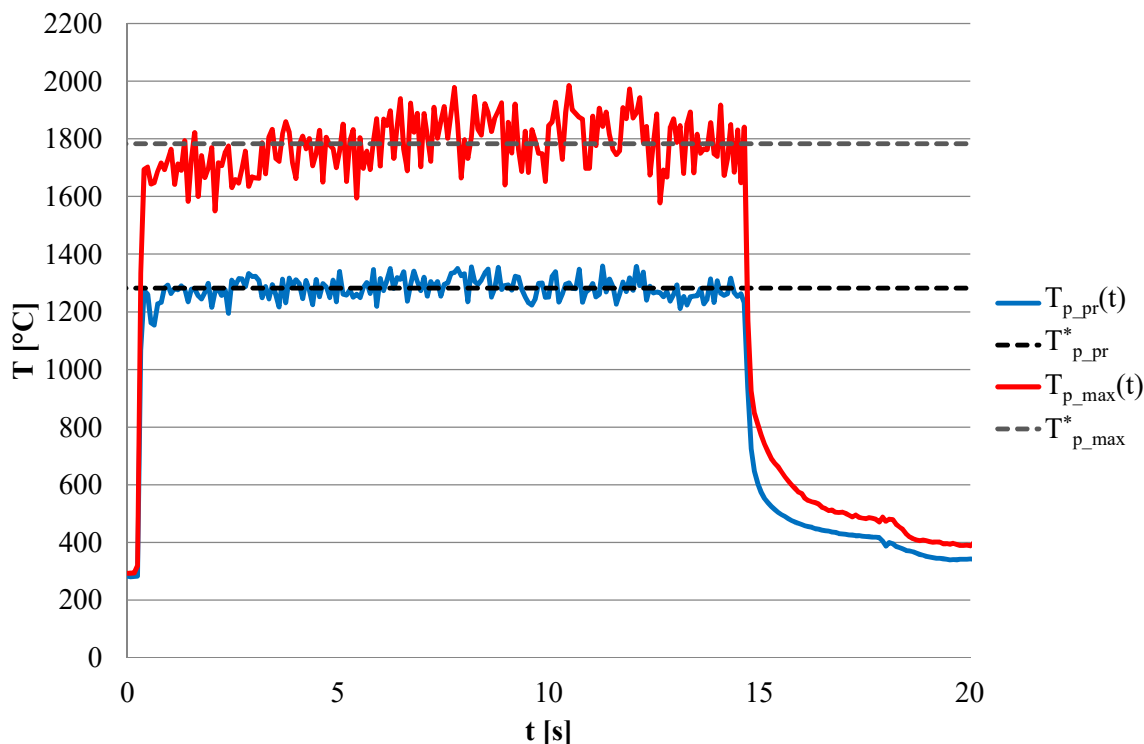


Obr. 4.12: Ukázka termogramu pohyblivé LWIR kamery

Z časových průběhů těchto vyhodnocených teplot byla stanovena výsledná průměrná teplota pro celý přejezd, tj. od počátku přejezdu v čase t_0 do konce přejezdu v čase t_{max} , dle vztahu:

$$T_{p_pr}^* = \frac{\sum_{t=0}^{t=max} T_{p_pr}(t)}{t_{max} - t_0} \quad (4.5)$$

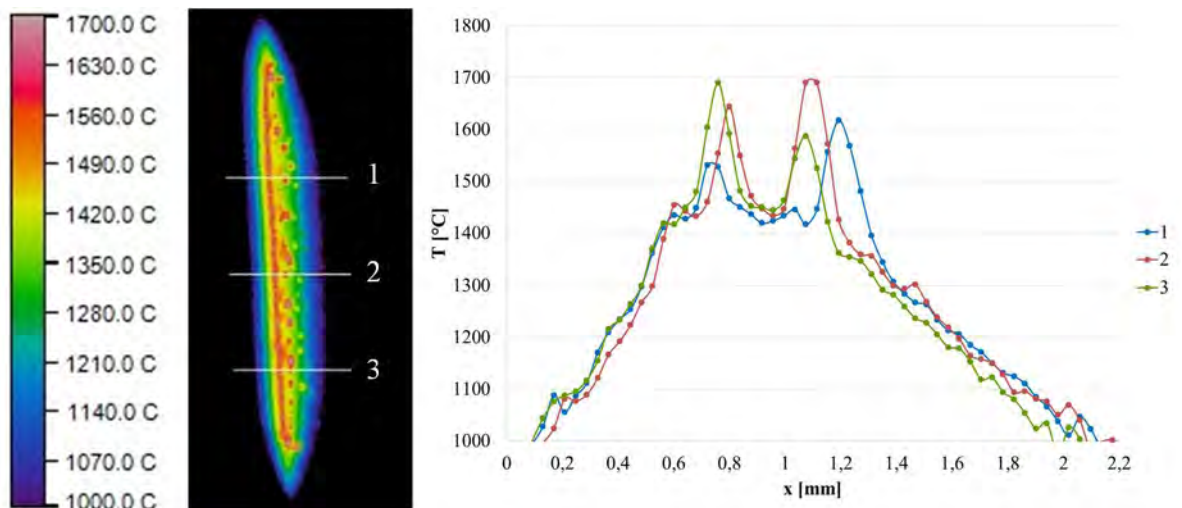
Ukázka průběhu vyhodnocovaných teplot pro přetavení jedné stopy je ukázána na Obr. 4.13.



Obr. 4.13: Ukázka vyhodnocení teplot z pohyblivé LWIR kamery FLIR A615

2) NIR kamera LumaSense MIKRON MCS640

Při použití této kamery s teleskopickým objektivem byla oblast taveniny a nejbližšího okolí zaznamenána ve větším prostorovém rozlišení umožňujícím detailnější analýzu průběhu teplot. Ze získaného záznamu bylo pro každý přejezd danými procesními parametry vybráno deset snímků rovnoměrně rozdělených po dobu přejezdu. V každém z těchto snímků byly exportovány průběhy teplot pro 3 čáry rovnoběžné se směrem zpracování, tj. kolmé k delší ose laserového spotu. Ukázka termogramu s příslušnými teplotními průběhy je na Obr. 4.14.



Obr. 4.14: Termogram z NIR kamery a příslušné teplotní průběhy

Jednotlivý teplotní průběh je označen $T_{NIR,i,j}(x, t=i)$, kde číslo čáry $j = 1 - 3$ a číslo snímku $i = 1 - 10$ a platí, že $t_i = t_0 + i \cdot \frac{(t_0 - t_{max})}{11}$. Z těchto dílčích teplotních průběhů je pak spočítán průměrný průběh teploty označený $T_{NIR}^*(x)$ po jednotlivých bodech následovně:

$$T_{NIR}^*(x) = \frac{\sum_{i=1}^{10} (\sum_{j=1}^3 T_{NIR,i,j}(t=i))}{10 \cdot 3} \quad (4.6)$$

Pro převod rozměrů z jednotek prostorového rozlišení px na metrické je stanoveno měřítko m , spočtené porovnáním reálné velikosti laserového spotu a jeho velikosti na termogramu:

$$m = \frac{D_a(\text{termogram})}{D_a} = \frac{305 \text{ px}}{12 \text{ mm}} = 25,4 \left[\frac{\text{px}}{\text{mm}} \right]; 1 \text{ px} = 39,4 \mu\text{m}. \quad (4.7)$$

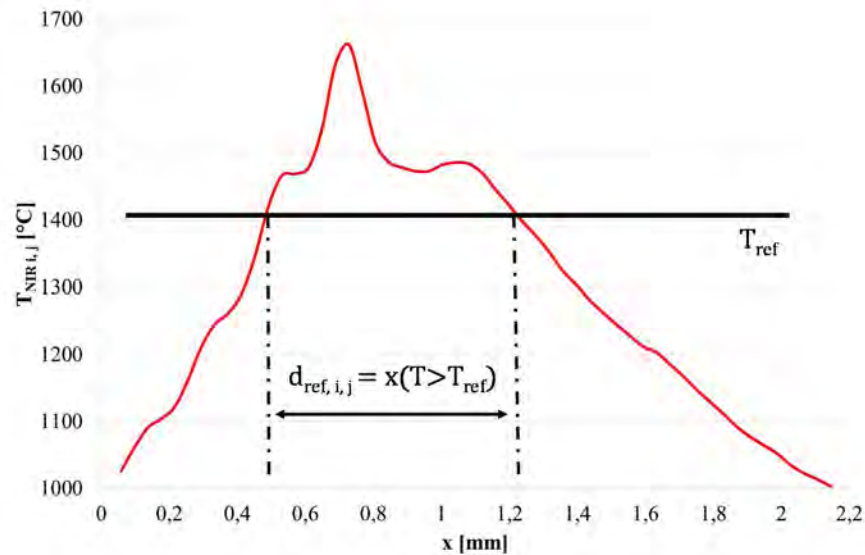
Postup výpočtu šířky taveniny

Teplotní průběhy z pohyblivé kamery byly dále využity k analýze rozměrů oblasti taveniny.

Pro tuto analýzu byly zvoleny následující referenční teploty taveniny $T_{ref,t}$:

- 1285 °C – udávaná spodní teplota rozmezí tavení,
- 1410 °C – udávaná vrchní teplota rozmezí tavení,
- 1500 °C – oblast taveniny s nejvyšší teplotou,
- 1000 °C – oblast taveniny a tepelně ovlivněné oblasti.

Dále je z dílčích teplotních průběhů $T_{NIR, i, j}(x, t=i)$ stanoven rozměr oblasti s teplotou vyšší než referenční teplota taveniny $T_{ref, t}$. Tento rozměr oblasti je dále označován jako šířka taveniny $d_{ref, i, j}$. Schéma stanovení šířky taveniny je znázorněno na Obr. 4.15.



Obr. 4.15: Znázornění výpočtu šířky taveniny

Výsledný rozměr oblasti označovaný jako šířka taveniny je pak stanoven jako aritmetický průměr následovně:

$$d_{ref} = \frac{\sum_{i=1}^{10} (\sum_{j=1}^3 d_{ref, i, j})}{10 \cdot 3} \quad (4.8)$$

4.4.3. Postup vyhodnocení naměřených dat ze statické kamery

Cílem vyhodnocení měření ze statické kamery je stanovení celkového průběhu teploty během přetavení, tj. včetně úseku ohřevu a následného chladnutí po přetavení. Postup vyhodnocení byl navržen tak, aby výsledkem byl:

- průměrný průběh teploty v jednom bodě během přetavení, tj. $T(x = \text{konst}, t)$,
- průběh maximální teploty během přetavení pro porovnání s pohyblivou kamerou.

Konkrétní postup vyhodnocení se pro dvě varianty metody přetavení částečně liší:

1) LWIR kamera Jenoptik VarioCAM hr head

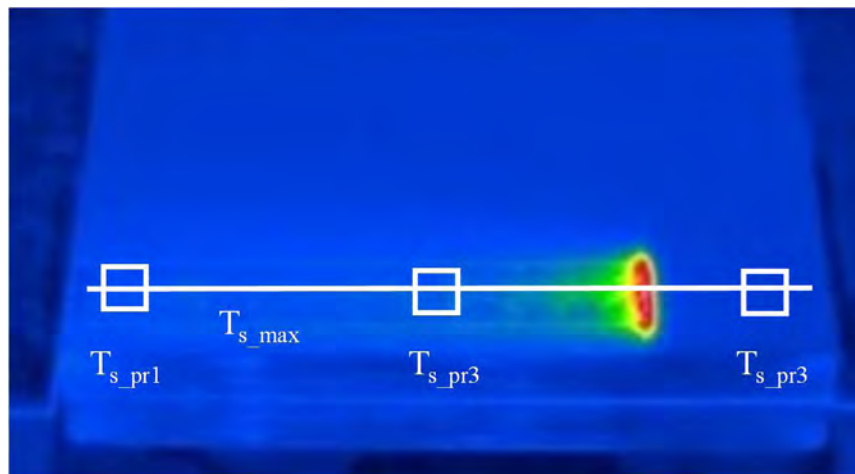
Postup použitý při variantě měření s dvěma LWIR kamerami.

Na termogramu byly zvoleny následující oblasti pro vyhodnocení teploty:

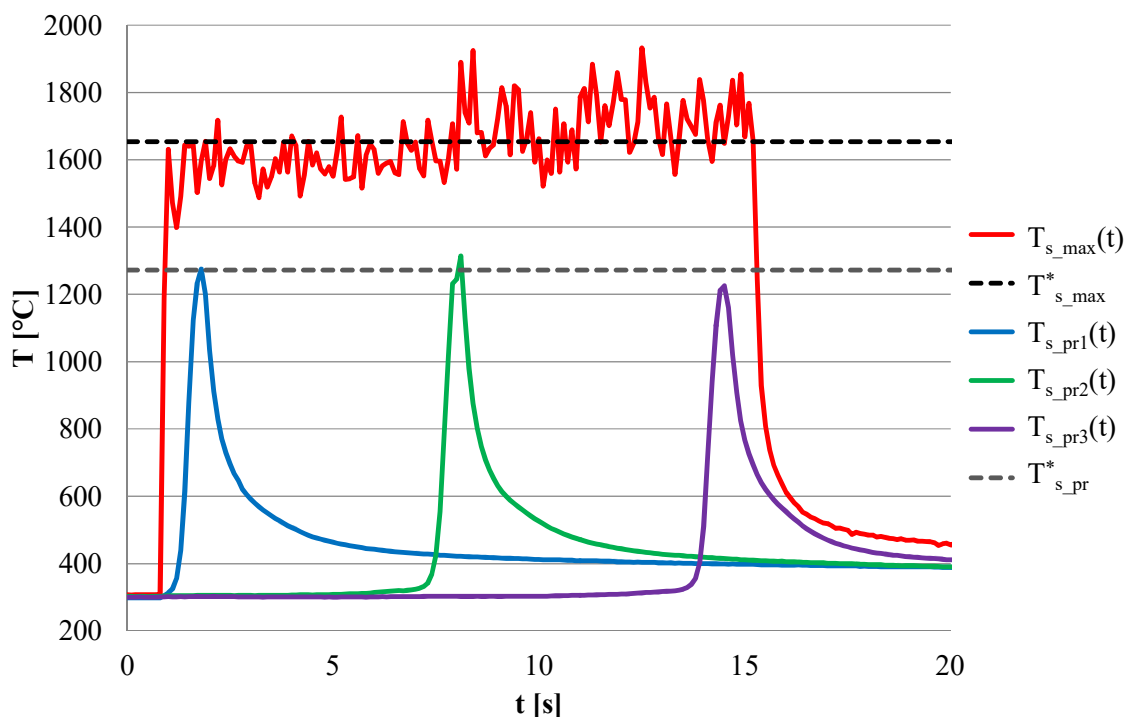
- $T_{s_pr1}(t)$, $T_{s_pr2}(t)$, $T_{s_pr3}(t)$ – průměrná teplota v oblasti na začátku, uprostřed a na konci přejezdu,
- $T_{s_max}(t)$ – maximální teplota na čáře.

Ukázka termogramu spolu s vyhodnocovanými oblastmi je na Obr. 4.16. Průběh těchto teplot během přetavení je ukázán na Obr. 4.17. Dále z časového průběhu teploty $T_{s_max}(t)$ byla stanovena výsledná průměrná hodnota pro celý přejezd, tj. od začátku přejezdu v čase t_0 do konce přejezdu v čase t_{max} , podobně jako u pohyblivé kamery dle vztahu (4.5). Teplota $T_{s_pr}^*$ je stanovena jako průměr z hodnot maxima jednotlivých časových průběhů $T_{s_pr1, 2, 3}(t)$:

$$T_{s_pr}^* = \frac{Max(T_{s_pr1}(t)) + Max(T_{s_pr2}(t)) + Max(T_{s_pr3}(t))}{3} \quad (4.9)$$



Obr. 4.16: Ukázka termogramu statické kamery Jenoptik VarioCAM

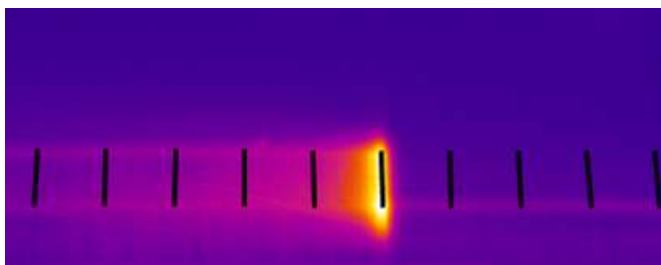


Obr. 4.17: Ukázka vyhodnocených teplot ze statické kamery Jenoptik VarioCAM hr head

2) LWIR kamera FLIR A615

Po modifikaci metody měření při použití NIR pohyblivé kamery byl postup vyhodnocení statické LWIR kamery také částečně modifikován. První důvod je, aby se průměroval průběh teploty z více oblastí a druhý důvod, aby výsledek byl jednoduše porovnatelný s výstupem z pohyblivé NIR kamery.

V jedné stopě přejezdu konstantními procesními parametry bylo rovnoměrně rozmístěno 10 čar rovnoběžných s delší osou laserového svazku. Ukázka termogramu a rozmístění čar ve stopě přejezdu jsou znázorněny na Obr. 4.18.



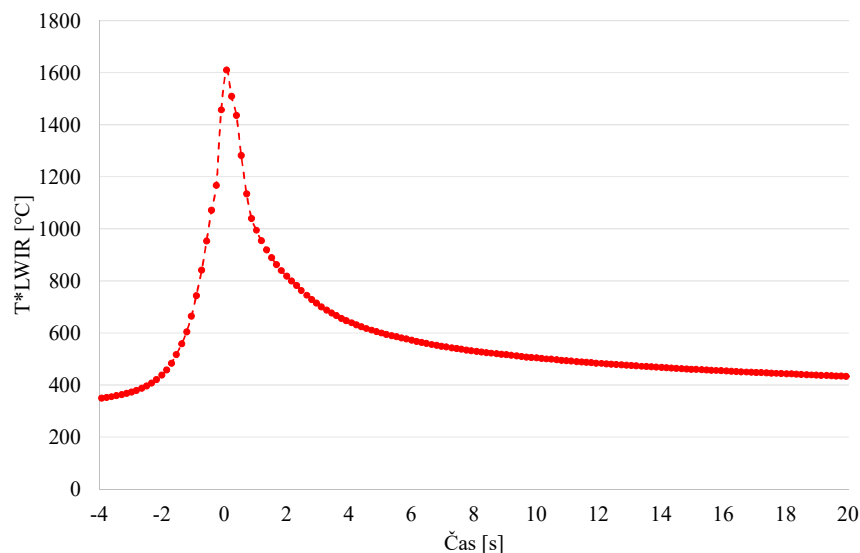
Obr. 4.18: Ukázka termogramu statické kamery FLIR A615

Následně byl analyzován časový průběh průměrné teploty na těchto čárách, tedy teplota dále označována jako $T_{LWIR,i}(x=i, t)$, kde pro číslo čáry $i=1-10$ platí, že $x_i = x_0 + i \cdot \frac{(x_0 - x_{max})}{11}$, kde x_0 je místo začátku přejezdu a x_{max} je místo konce přejezdu.

V dalším kroku je časová osa dílčích teplotních průběhů posunuta tak, aby v čase $t=0$ byla dosažena maximální teplota, tedy tak, aby se průběhy teplot $T_{LWIR,i}(x=i, t)$ kryly. Výsledný průběh teploty označený jako $T^*_{LWIR}(t)$ je pak získán zprůměrováním jednotlivých dílčích přejezdů následovně:

$$T^*_{LWIR}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{i=10} T_{LWIR,i}(x=i, t)}{10}. \quad (4.10)$$

Příklad průběhu teploty $T^*_{LWIR}(t)$ je ukázán na Obr. 4.19.



Obr. 4.19: Ukázka průběhu teploty $T^*_{LWIR}(t)$

Vyhodnocení doby ohřevu a chladnutí

Cílem dalšího vyhodnocení je stanovení rychlostí ohřevu a chladnutí během přetavení. Analýza vychází ze stanovených průběhů teploty v čase, tj. z průběhů teplot $T_{s,pr1,2,3}(t)$ a teploty $T^*_{LWIR}(x = konst, t)$.

Pro výpočet doby ohřevu a chladnutí byly zvoleny následující teploty:

- $T_0 = 350^\circ\text{C}$ – teplota přehřevu,
- T_{\max} – maximální dosažená teplota,
- $T_{\text{ref_chl}} = 600^\circ\text{C}$, případně $T_{\text{ref_chl}} = 450^\circ\text{C}$ – referenční teplota pro dobu chladnutí.

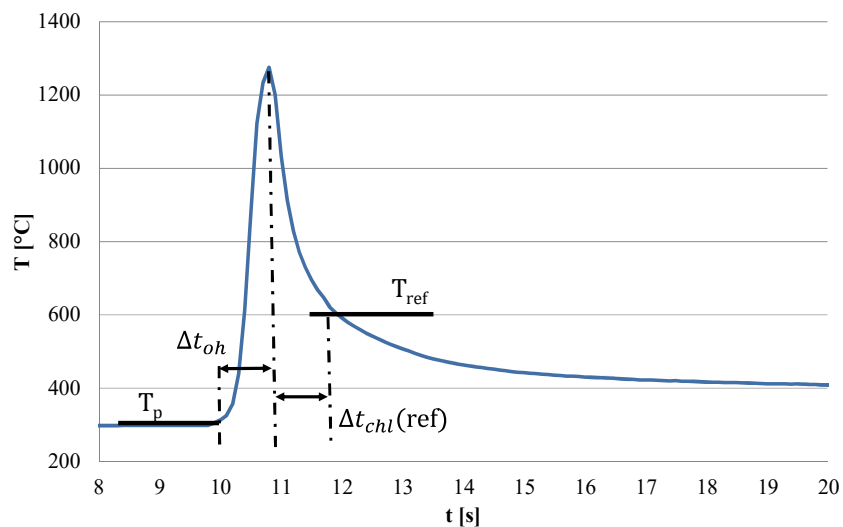
Ukázka stanovení doby ohřevu a chladnutí z teplotního průběhu je ukázána na Obr. 4.20.

Postup stanovení doby ohřevu Δt_{oh} a doby chladnutí $\Delta t_{chl}(\text{ref})$ je následující:

$$\Delta t_{oh} = t(T_{\max}) - t(T > T_0), \quad (4.11)$$

$$\Delta t_{chl}(\text{ref}) = t(T < T_{\text{ref_chl}}) - t(T_{\max}), \quad (4.12)$$

kde $t(T)$ je čas kdy poprvé došlo k překročení dané teploty.



Obr. 4.20: Výpočet doby ohřevu a chladnutí z teplotního průběhu

Použitá frekvence měření při záznamu této teploty byla 6,25 Hz. Nepřesnost stanovení doby ohřevu a chladnutí je tedy $\pm 0,16$ s.

4.4.4. Určení emisivity pro LWIR kamery

Pro kvantitativní vyhodnocení teplot z měření je nutné stanovit emisivitu měřeného povrchu. Z důvodu, že stav povrchu před přetavením a po přetavení různými parametry může být značně rozdílný, je nutné stanovit emisivitu pro každou variantu stavu povlaku. Dalším

faktorem je, že emisivita je teplotně a úhlově závislá veličina. Cílem je tak stanovit emisivitu pro teploty blízké dosahovaným teplotám během procesu, ideálně stanovit teplotní závislost emisivity, tj. $\varepsilon(T)$. Dále může být pro jednotlivé kamery hodnota emisivity částečně odlišná. Sice mají stejný typ detektoru a snímané pásmo vlnových délek, ale spektrální citlivost detektoru či propustnost optiky se může lišit a to se projeví změnou emisivity, která je při výpočtu uvažována jako konstantní pro celý rozsah vlnových délek. Emisivita je tedy stanovena pro jednotlivé kamery zvlášť.

Postup stanovení emisivity je rozdělen do dvou částí. Při měření se dvěma LWIR kamerami byla emisivita stanovena za využití termovizní barvy. Po úpravě metody při měření s NIR kamerou bylo použito porovnání vyhodnocených teplotních průběhů.

Pro nízké teploty

Emisivita je určena porovnáním oblastí na vzorku se stejnou teplotou, kdy část vzorku byla opatřena vysokoteplotní termovizní barvou ThermaSpray 800 Black se změřenou emisivitou $\varepsilon_b = 0,93$ [65]. Vzorek je během stanovení umístěn na topné desce. Emisivita nepřetaveného povlaku (ε_n) byla určena při ustálení vzorku na teplotě přehřevu 350 °C. Emisivita povlaku přetaveného jednotlivými parametry (dle Tab. 4.1) je označována jako $\varepsilon_{p(i)}$. Byla určena porovnáním sousedních oblastí, přetavené a nepřetavené, po ustálení teploty vzorku na teplotě blízké teplotě přehřevu. Ukázka porovnávaných oblastí na vzorku je na Obr. 4.21.

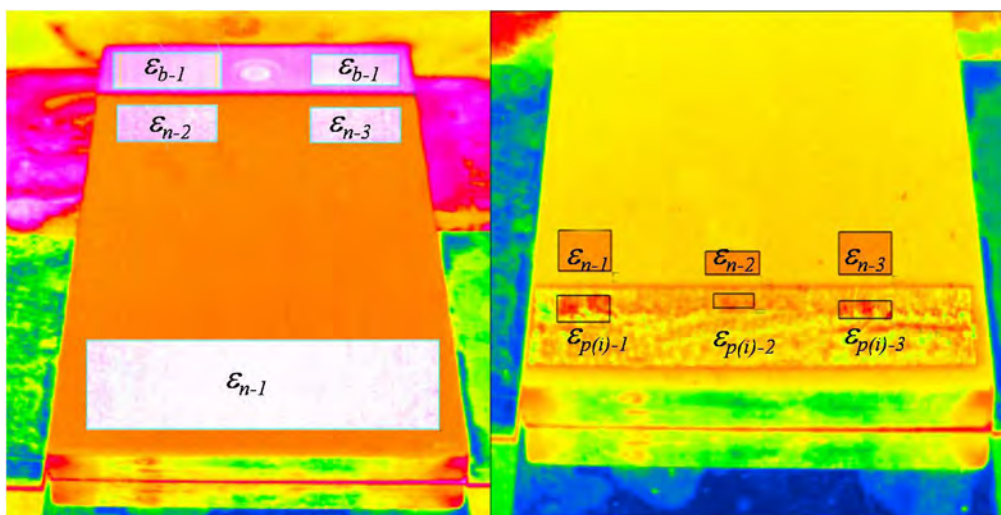
Neznámá emisivita byla stanovena výpočtem ze známé teploty následovně:

$$\varepsilon_n = \frac{\sum_j \varepsilon_{n-j}}{j}; T(\varepsilon_{n-j}) = T(\varepsilon_{b-j}) = 350 \text{ °C}, \quad (4.13)$$

$$\varepsilon_{p(i)} = \frac{\sum_j \varepsilon_{p(i)-j}}{j}; T(\varepsilon_{p(i)-j}) = T(\varepsilon_{n-j}), \quad (4.14)$$

kde index j označuje číslo oblasti.

Stanovené hodnoty emisivity nepřetaveného a přetaveného povlaku Stellite 6 pro obě použité LWIR kamery jsou uvedeny v Tab. 4.6.



Obr. 4.21: Ukázka porovnávaných oblastí pro stanovení emisivity před přetavením (vlevo) a po přetavení (vpravo)

Tab. 4.6: Emisivita povlaku Stellitu 6 pro použité LWIR kamery

Povlak Stellitu	průměrná emisivita ε	
	Flir A615	VarioCam hr head
nepřetavený	0,57	0,49
parametry č. 1	0,69	0,54
parametry č. 2	0,70	0,56
parametry č. 3	0,67	0,58
parametry č. 4	0,71	0,60
parametry č. 5	0,75	0,69
parametry č. 6	0,77	0,68

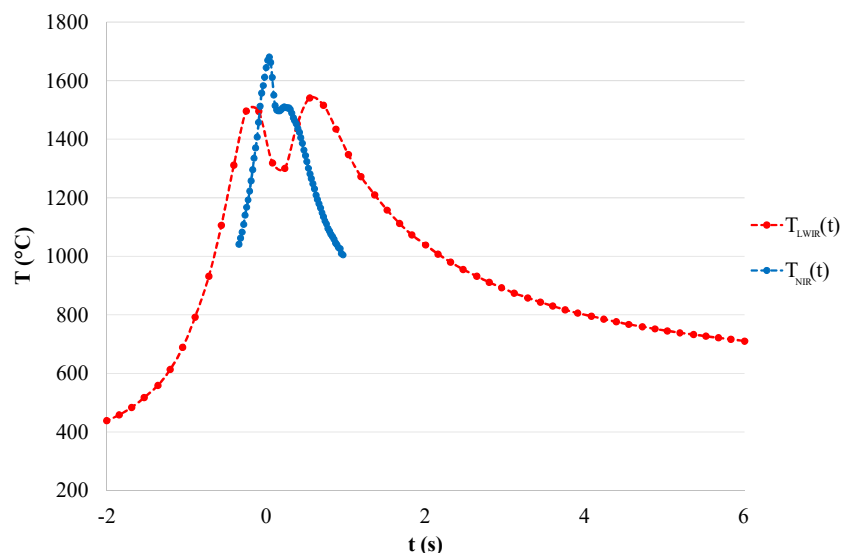
Pro vysoké teploty

Nedostatkem předchozího postupu je stanovení emisivity pouze pro teploty blízké teplotě přehřevu, tj. 350 °C. Cílem následujícího postupu je tak určit průběh emisivit během přetavení, tj. pro vysoké teploty a taveninu, $\varepsilon_{vt}(t)$. K tomu je využito porovnání stanovených průměrných teplotních průběhů z pohyblivé NIR kamery $T_{NIR}^*(x, t = konst)$ a statické LWIR kamery $T_{LWIR}^*(x = konst, t)$.

Prvním krokem je přepočítání prostorového rozložení teplot z NIR kamery na časový průběh a to pomocí procesní rychlosti v [mm/s]:

$$T_{NIR}^*(x, t = konst) = T_{NIR}^*(x = konst, t), t = \frac{x}{v} \quad (4.15)$$

Průběh teploty z LWIR kamery je nejprve vyhodnocen s konstantní emisivitou zadanou během měření – emisivitou nepřetaveného povlaku stanovenou předchozím postupem, tj. $T_{LWIR}^*(t, \varepsilon_n)$. Následně jsou teplotní průběhy srovnány v časové ose tak, aby si vzájemně odpovídaly, tj. podle oblasti taveniny, ohřevu a chladnutí. Ukázka porovnání teplotních průběhů je na Obr. 4.22.



Obr. 4.22: Ukázka průběhu teplot $T_{NIR}^*(t)$ a $T_{LWIR}^*(t, \varepsilon_n = konst)$

Teplota $T_{NIR}^*(t)$ se uvažuje jako správná a tudíž by jí měla odpovídat teplota $T_{LWIR}^*(t, \varepsilon_{vt}(t))$ stanovená se správnou emisivitou pro vysoké teploty v odpovídajícím čase $\varepsilon_{vt}(t)$, tedy:

$$T_{LWIR}^*(t, \varepsilon_{vt}(t)) = T_{NIR}^*(t) \rightarrow \varepsilon_{vt}(t). \quad (4.16)$$

V daný čas t je neznámá emisivita $\varepsilon_{vt}(t)$ spočtena z těchto dvou teplot při využití vztahů (4.3) a (4.4). Při výpočtu je z důvodu malé vzdálenosti mezi kamerou a měřeným objektem zanedbána propustnost atmosféry a dále z důvodu výrazně vyšší teploty měřeného objektu než jeho okolí je zanedbáno záření okolních předmětů. Výsledný vztah pro stanovení neznámé emisivity je následující:

$$\varepsilon_{vt}(t) = \frac{\varepsilon_n \cdot L_{obj}^{BB}(\lambda_{LWIR}, T_{LWIR}^*(t, \varepsilon_n))}{L_{obj}^{BB}(\lambda_{LWIR}, T_{NIR}^*(t))}. \quad (4.17)$$

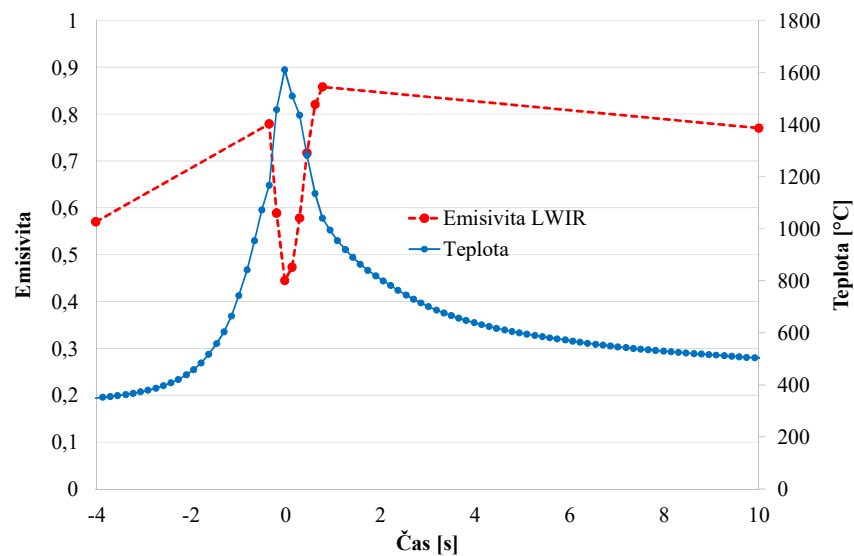
Určení výsledného průběhu teplot

Průběh emisivity $\varepsilon_{vt}(t)$ pro vysoké teploty stanovené v předchozím kroku je doplněn o hodnoty emisivity před přetavením ε_n a po přetavení ε_p pro nízké teploty. Získán je tak celkový průběh emisivity v čase během přetavení, tj. $\varepsilon_{LWIR}(t)$. Nebo po úpravě závislost emisivity na teplotě, tj. $\varepsilon_{LWIR}(T)$.

Výsledný průběh teploty $T^*_{LWIR}(t)$ je stanoven přepočtem původního průběhu teploty $T^*_{LWIR}(t, \varepsilon_n)$ stanoveného s konstantní emisivitou za využití emisivity závislé na teplotě $\varepsilon_{LWIR}(t)$ při zanedbání propustnosti atmosféry a záření okolních předmětů následovně:

$$T^*_{LWIR}(t)[K] = \frac{K_1}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{LWIR}(t) \cdot K_2}{\varepsilon_n \cdot L_{obj}^{BB}(\lambda_{LWIR}, T^*_{LWIR}(t, \varepsilon_n))} + 1\right)}. \quad (4.18)$$

Ukázka výsledného průběhu teploty $T^*_{LWIR}(t)$ a průběhu emisivity $\varepsilon_{LWIR}(t)$ během přetavení je na Obr. 4.23.



Obr. 4.23: Průběh emisivity $\varepsilon_{LWIR}(t)$ a výsledné teploty $T^*_{LWIR}(t)$ během přetavení

5. Výsledky a diskuze

Kapitola je rozdělena na dvě části. V první části jsou uvedeny vybrané výsledky provedené tepelné analýzy procesu laserového přetavování povlaku Stellite. Druhá část je pak věnována samotné měřicí metodě, charakteristikám jednotlivých variant a diskusi ohledně možnosti aplikace.

5.1. Výsledky analýzy procesu přetavování povlaku Stellite

Ukázány jsou hlavní výsledky získané použitím vyvíjené měřicí metody na proces přetavení povlaku Stellite 6. Nejprve je popsán stav povlaku po přetavení, dále je analyzován vztah mezi získanými výsledky měření a technologickými parametry přetavení a následně korelace vybraných charakteristik procesu s dosaženou hloubkou protavení. Tato část tak dokumentuje praktickou použitelnost vyvinuté měřicí metody ve výzkumu procesů laserového přetavování.

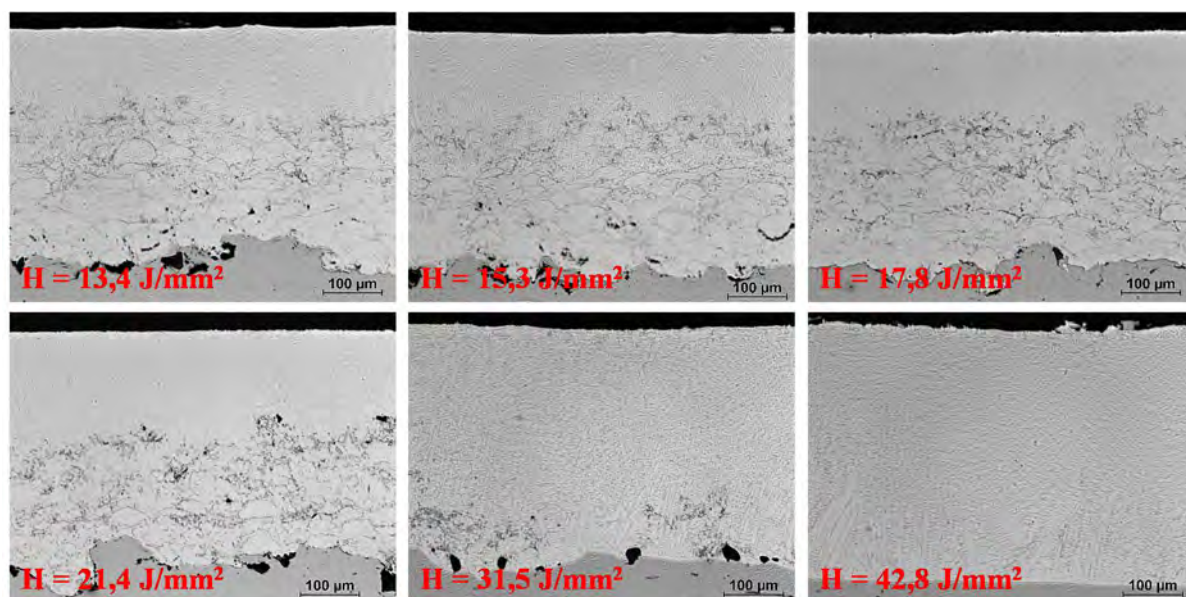
5.1.1. Závislost hloubky protavení na procesních parametrech

Přetavením HVOF povlaku Stellite 6 dochází k přeměně jeho mikrostruktury. Nepřetavený povlak se přitom skládá z jednotlivých splatek, na hranicích mezi nimi je zbytková pórovitost. Na rozhraní se substrátem se místy nachází částice korundu (Al_2O_3) jako pozůstatek otryskávání.

Výsledkem přetavení je gradientní struktura od povrchu do hloubky povlaku, která odráží tepelné podmínky během procesu. Při nižších dávkách ozáření je nejvíce ovlivněna horní vrstva povlaku, která byla roztavena a následně znovu ztuhla. Tato vrstva je ztuhlejší a jsou odstraněny hranice mezi jednotlivými splatek. Směrem k substrátu se dosažená maximální teplota snižuje a následuje tak přechod mezi přetavenou a rekrystalizovanou oblastí. Zde se ještě částečně vyskytuje zbytková pórovitost a to převážně v místech předchozích hranic splatek. Nejbližší substrátu, kde byla nejnižší teplota, je pak nejméně ovlivněná oblast, kde jsou stále znatelné jednotlivé splatek, avšak uvnitř nich proběhla rekrystalizace.

Se zvyšující se dávkou ozáření se postupně zvyšuje tloušťka vrstvy, která byla přetavena. Při nejvyšší použité dávce ozáření pak dojde k plnému přetavení povlaku a natavení rozhraní se substrátem, čímž vznikne metalurgická vazba. Mikrostruktura plně přetaveného povlaku je dendritická a obsahuje pouze minimum pórů. Velikost dendritů je stejnoměrná v celé tloušťce

povlaku. Výsledné struktury povlaku přetaveného do různé hloubky jsou uvedeny na Obr. 5.1. Jedná se o vzorek A2 (S10/P0,4) přetavený zvyšující se dávkou ozáření dle parametrů přetavení uvedených v Tab. 4.1.



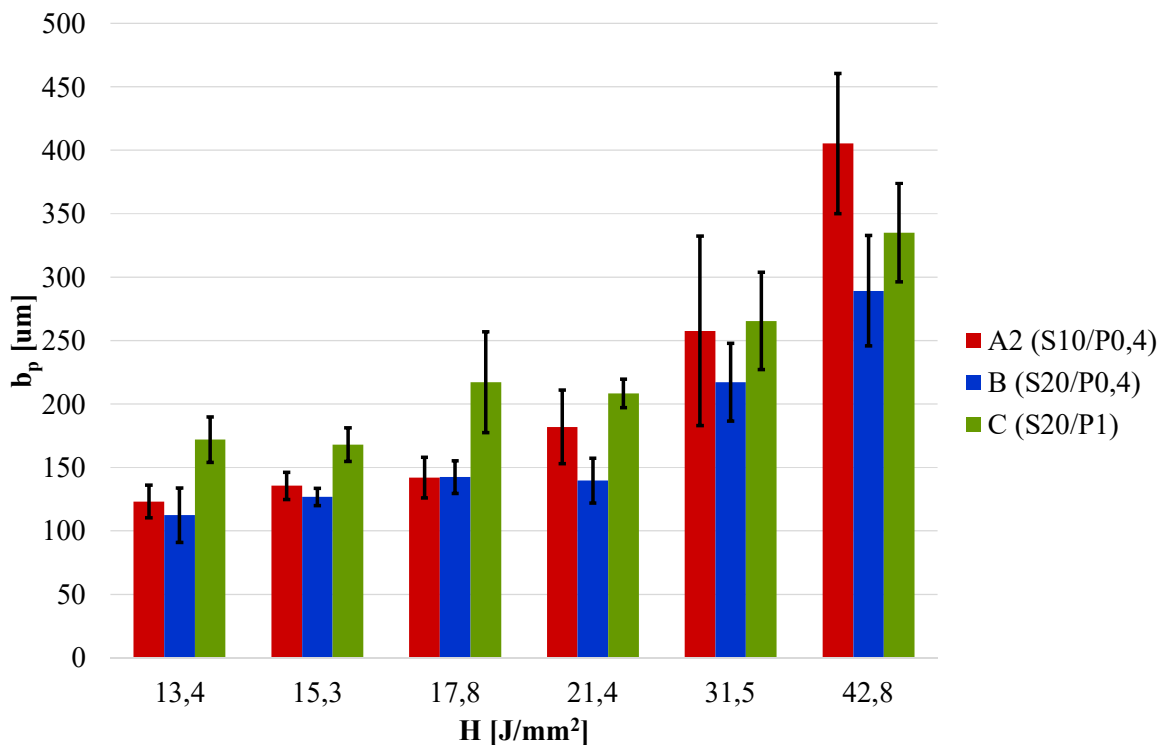
Obr. 5.1: Struktury povlaku Stellite 6 na vzorku A2(S10/P0,4) přetaveného použitím různé dávky ozáření

Přehled dosažené hloubky protavení spolu se změřenou tloušťkou původního nepřetaveného povlaku je uveden v Tab. 5.1 a to pro vzorky s různou tloušťkou povlaku a substrátu (viz označení a rozměry vzorků, kapitola 4.2.1).

Tab. 5.1: Hloubka protavení pro jednotlivé vzorky a tloušťka původního nepřetaveného povlaku

Dávka ozáření H [J/mm ²]	Hloubka protavení [µm]		
	A2 (S10/P0,4)	B (S20/P0,4)	C (S20/P1)
13,4	132 ± 13	112 ± 21	172 ± 18
15,3	136 ± 11	127 ± 7	168 ± 13
17,8	142 ± 16	142 ± 13	217 ± 40
21,4	182 ± 29	140 ± 18	208 ± 11
31,5	258 ± 75	217 ± 31	265 ± 38
42,8	405 ± 55	289 ± 44	335 ± 39
Tloušťka původního nepřetaveného povlaku	397 ± 23	401 ± 16	1073 ± 28

Dosažená hloubka protavení se pohybuje od 112 do 405 μm a zvyšuje se s rostoucí dávkou ozáření. Tudiž při zvoleném konstantním výkonu laseru 1070 W a intenzitě ozáření 59,2 W/mm² se hloubka protavení zvyšuje se snižující se procesní rychlostí ze 40 na 12,5 cm/min. Vývoj hloubky protavení v závislosti na dávce ozáření je též zobrazen na Obr. 5.2.



Obr. 5.2: Závislost hloubky protavení na intenzitě ozáření na vzorcích A2, B a C

Na Obr. 5.2 je navíc dobře patrný rozdíl v dosažené hloubce protavení při konstantní dávce ozáření v závislosti na změně geometrie vzorku. Při stejné tloušťce povlaku je vzorek s větší tloušťkou substrátu B (S20/P0,4) přetaven do menší hloubky než vzorek s tenčím substrátem A2 (S10/P0,4). Důvod je, že substrát s větší tloušťkou má větší celkovou tepelnou kapacitu. Teplo z povlaku je tak efektivněji odváděno do substrátu a ve výsledku dojde k menšímu protavení. Rozdíl je markantnější při vyšších dávkách ozáření, kdy se více projeví větší efektivita odvodu tepla. Analogii lze najít v procesu laserového kalení, kdy efektivnější odvod tepla do substrátu vede k výsledné menší hloubce prokalení [88].

Rozdílné hloubky protavení je dosaženo i v případě různé tloušťky povlaku a stejné tloušťky substrátu. U vzorku C (S20/P1) došlo k většímu protavení než u vzorku B (S20/P0,4). Stellite 6 ve formě HVOF nástřiku má menší tepelnou vodivost než ocelový

substrát [80, 89, 90]. Povlak tak při větší tloušťce působí jako tepelná bariéra. Absorbovaná energie není efektivně odváděna do substrátu a dojde tak k natavení většího objemu povlaku.

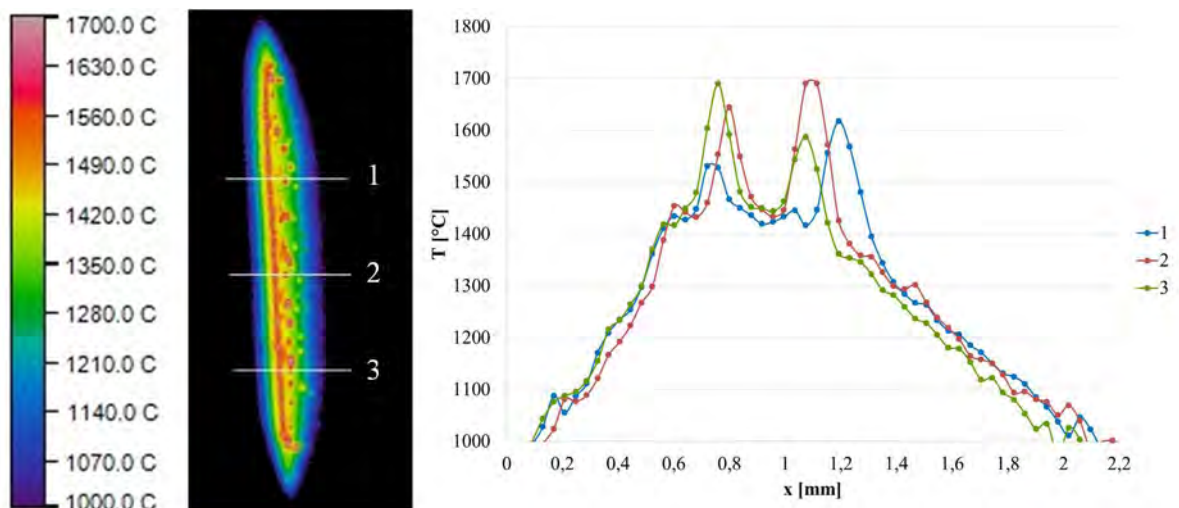
U vzorku C (S20/P1) s velkou tloušťkou povlaku je vývoj hloubky protavení nepravidelný a výsledná hloubka protavení má větší směrodatnou odchylku než u vzorků s tenčím povlakem. Tloušťka povlaku tak nepříznivě ovlivňuje rovnoměrnost protavení.

5.1.2. Teplotní charakteristiky procesu přetavení

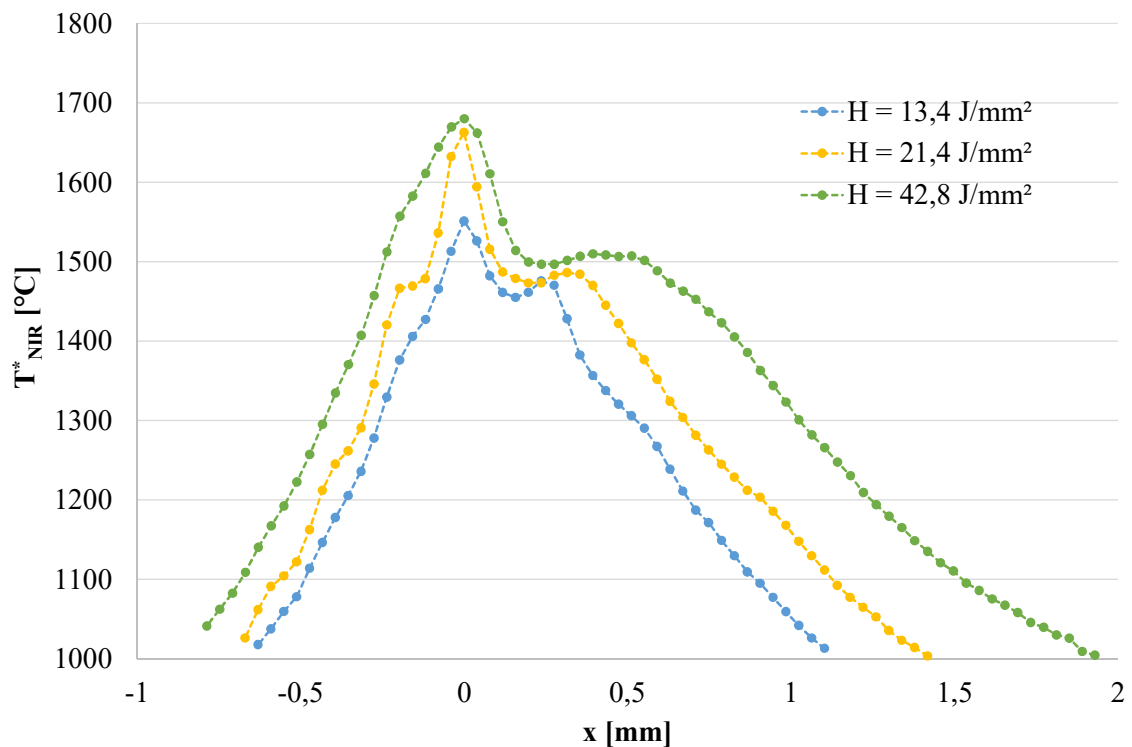
Základní teplotní charakteristika procesu přetavení, která je měřicím systémem přímo poskytována, je průběh teploty povrchu vzorku. Dalšími charakteristikami, které lze vyhodnotit, jsou doby ohřevu a chladnutí či šířka taveniny.

Teplota v místě působení laserového paprsku

Průběh teploty v místě působení laserového paprsku byl vyhodnocen z pohyblivé NIR kamery z důvodu vyšší přesnosti stanovení teplot a díky vyššímu prostorovému rozlišení kamery. Na Obr. 5.3 je ukázán získaný termogram a teplotní průběhy napříč taveninou, tj. průběhy teplot $T_{NIR,i}(x)$, v jednom snímku při přetavení s dávkou ozáření $17,8 \text{ J/mm}^2$. Dále na Obr. 5.4 jsou ukázány průměrné teplotní průběhy, tj. teplota $T^*_{NIR}(x)$, pro tři různé hodnoty dávky ozáření.



Obr. 5.3: Teplota $T_{NIR,i}(x)$ v místě interakce při dávce ozáření $17,8 \text{ J/mm}^2$



Obr. 5.4: Průměrná teplota $T^*_{NIR}(x)$ pro různé dávky ozáření

Jak je vidět z termogramu a z průběhů teploty, v přední části působení laserového paprsku dochází k rychlému nárůstu teploty na 1550 až 1700 °C. Zde se nachází pruh taveniny, jehož šířka je závislá na použité dávce ozáření. Teplotní průběhy mají ještě druhý vrchol odpovídající ostrůvkům s vyšší teplotou, které vznikají jako důsledek proudění v tavné lázni a nerovnoměrnosti chladnutí způsobené specifickou strukturou žárového nástřiku. Tyto ostrůvky nemají pevnou vzdálenost od hlavního pruhu tavné lázně a jejich maximální teplota též nedosahuje vždy maximální teploty v přední části laserového spotu. Na průměrném průběhu teploty $T^*_{NIR}(x)$ tak má tento druhý vrchol nižší teplotu avšak větší šířku.

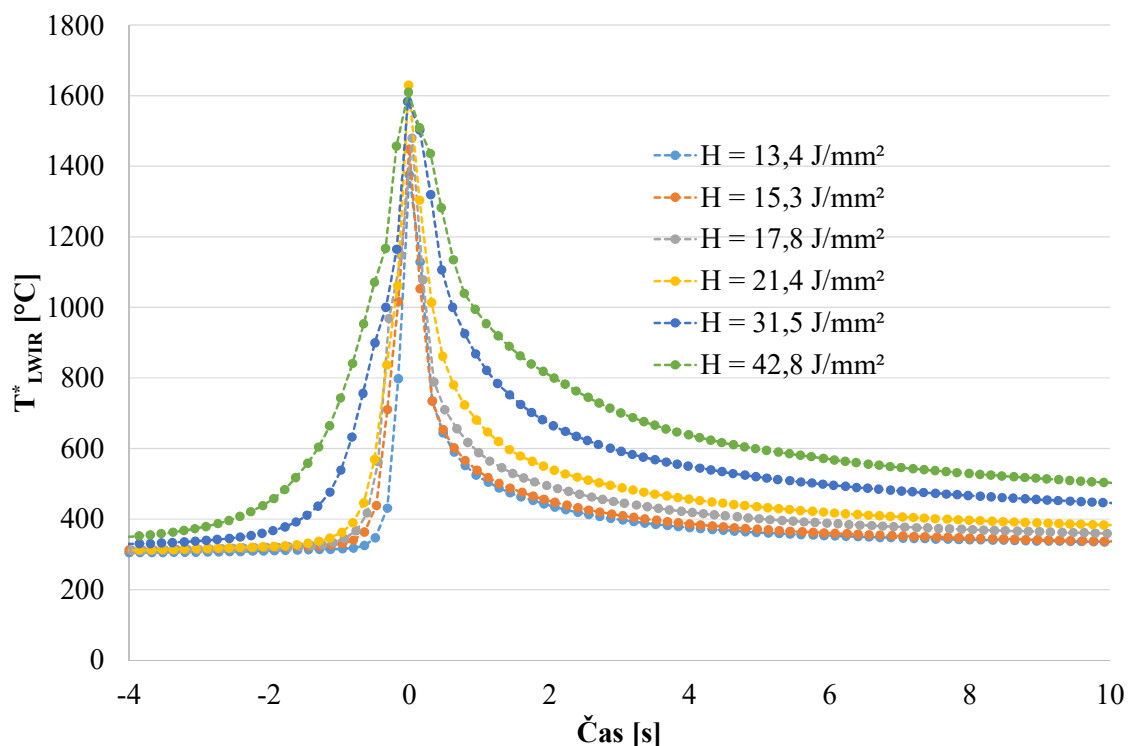
Na Obr. 5.4 je vidět, jak se se zvyšující dávkou ozáření rozšiřuje oblast taveniny. Naopak maximální teplota příliš neroste. Růst objemu nataveného materiálu bez výrazného nárůstu maximální teploty je důsledkem volby procesních parametrů. Díky použitému konstantnímu výkonu a tudíž konstantní intenzitě ozáření $E [W/mm^2]$ dochází k rovnoměrnému ohřevu povrchové vrstvy. Při zvýšení dávky ozáření $H [J/mm^2]$ snížením procesní rychlosti je tak absorbované teplo rovnoměrně rozvedeno do povlaku a tím roste objem materiálu ohřátého na vysokou teplotu. K menšímu nárůstu maximální povrchové teploty při zvyšující se dávce ozáření dochází, protože vnesené teplo je pohlcováno latentním teplem tavení při změně fáze.

Je nutné podotknout, že pro nejvyšší použitou dávku ozáření $42,8 \text{ J/mm}^2$ nebyla přesná maximální teplota stanovena, protože došlo k překročení použitého měřicího teplotního rozsahu kamery.

Průměrné průběhy teplot

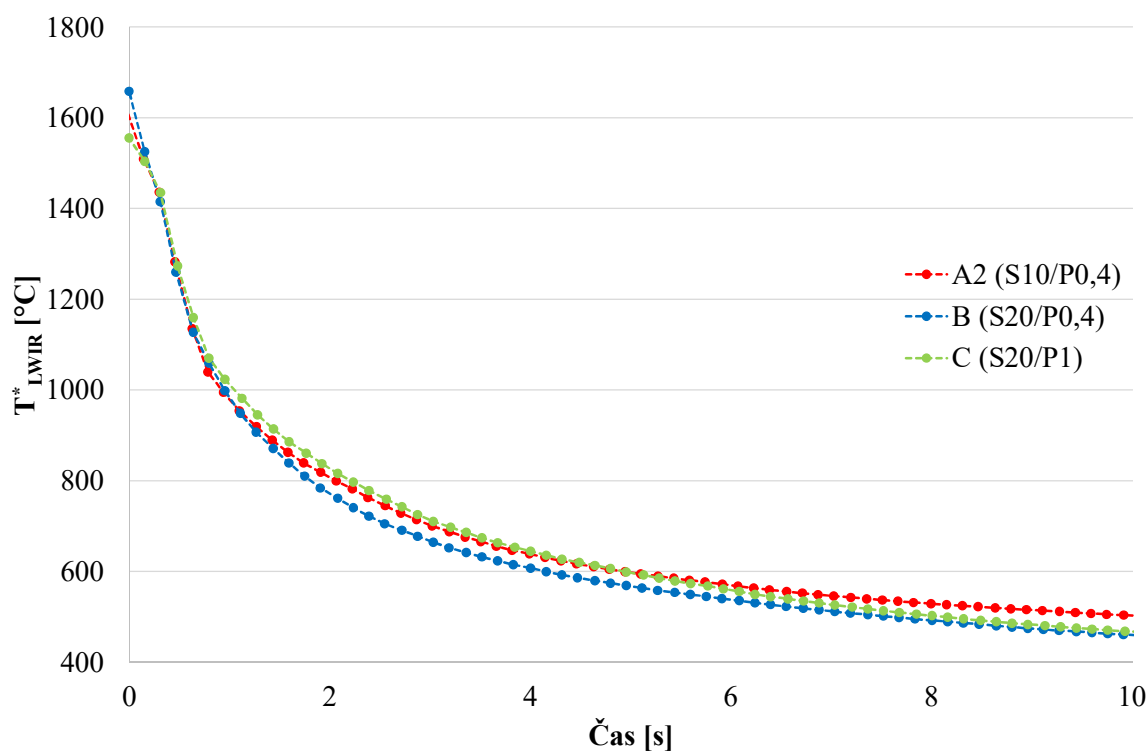
Průběh teploty $T^*_{\text{LWIR}}(t)$ představuje průměrný teplotní průběh pro libovolný bod na povrchu vzorku v trajektorii přejezdu laserovým svazkem během procesu přetavení. Tento průběh teploty vypovídá především o charakteru ohřevu a chladnutí v závislosti na procesních parametrech. Průběh $T^*_{\text{LWIR}}(t)$ byl vyhodnocen ze statické kamery při použití teplotně závislé emisivity.

Vliv procesních parametrů na průměrný teplotní průběh $T^*_{\text{LWIR}}(t)$ je ukázán na Obr. 5.5, při přetavení vzorku A2. Při nejnižších dávkách ozáření, tj. při vyšší použité procesní rychlosti, je ohřev a následné chladnutí velmi rychlé. S rostoucí dávkou ozáření při snižování procesní rychlosti, doba ohřevu a především chladnutí se postupně prodlužuje. I v tomto grafu je vidět, že maximální dosažená teplota se lehce zvyšuje se zvyšující se dávkou ozáření.



Obr. 5.5: Průběh teploty $T^*_{\text{LWIR}}(t)$ při různých dávkách ozáření pro vzorek A2

Vliv rozměrů přetavovaného vzorku, tj. tloušťka substrátu a povlaku, se projeví především na charakteru chladnutí, jak je ukázáno na Obr. 5.6, kde je zobrazena část teplotního průběhu při konstantní dávce ozáření $42,8 \text{ J/mm}^2$ pro všechny přetavované vzorky. U vzorku A2 s tenkým substrátem se zpomaluje chladnutí oproti vzorkům s tlustším substrátem z důvodu dřívějšího ohřátí substrátu a snížení efektivity odvodu tepla. Větší tloušťka povlaku u vzorku C se projeví spíše v první fázi chladnutí, kdy tento vzorek má cca do 8 s od dosažení maxima znatelně vyšší teplotu než vzorek s tenčím povlakem B. Důvodem je nižší teplotní vodivost povlaku Stellitu 6.



Obr. 5.6: Průběh teploty při chladnutí různých vzorků při stejné dávce ozáření

Doby ohřevu a chladnutí

Doby ohřevu a chladnutí přinášejí zjednodušenou informaci o dynamice procesu přetavování. Výhodou je, že se jedná se o konkrétní hodnotu snadno porovnatelnou pro různé procesní parametry. Doby ohřevu a chladnutí jsou spočteny z průměrných teplotních průběhů představených výše. Jedná se o dobu, za kterou došlo k ohřevu z počáteční teploty na maximální a následně pak dobu, za kterou došlo k vychladnutí na referenční teplotu chladnutí 600 °C a 400 °C .

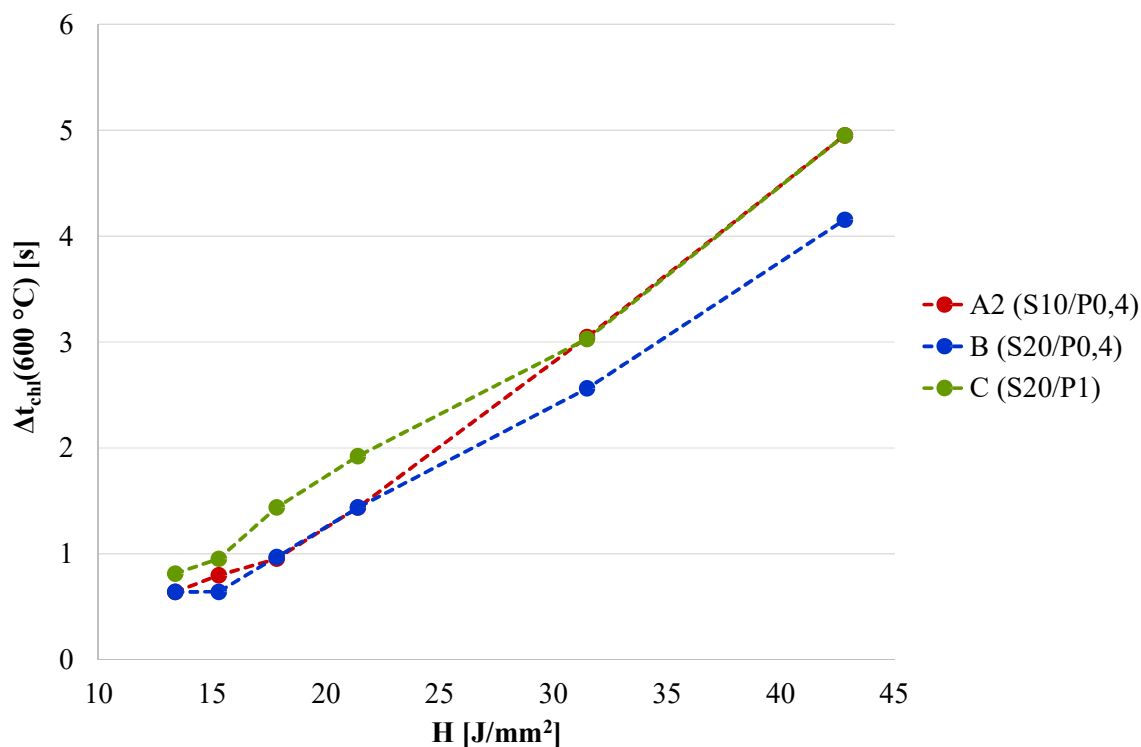
Vyhodnocené doby ohřevu a chladnutí v závislosti na procesních parametrech pro vzorky A2, B a C jsou uvedeny v Tab. 5.2 a v Tab. 5.3. Závislost doby chladnutí na referenční teplotu chladnutí 600 °C na procesních parametrech je dále znázorněna na Obr. 5.7.

Tab. 5.2: Doba ohřevu pro vzorky A2, B a C

Dávka ozáření H [J/mm ²]	Δt_{oh} [s]		
	A (S10/P0,4)	B (S20/P0,4)	C (S20/P1)
13,4	0,31	0,64	0,47
15,3	0,64	0,64	0,64
17,8	0,80	0,95	0,64
21,4	0,95	0,97	0,95
31,5	2,23	2,25	2,40
42,8	3,84	4,64	4,80

Tab. 5.3: Doba chladnutí pro vzorky A2, B a C

Dávka ozáření H [J/mm ²]	$\Delta t_{chl}(600\text{ °C})$ [s]			$\Delta t_{chl}(400\text{ °C})$ [s]		
	A (S10/P0,4)	B (S20/P0,4)	C (S20/P1)	A (S10/P0,4)	B (S20/P0,4)	C (S20/P1)
13,4	0,64	0,64	0,81	3,05	3,84	3,20
15,3	0,80	0,64	0,95	3,53	3,03	3,67
17,8	0,95	0,97	1,44	4,76	4,64	5,28
21,4	1,44	1,44	1,92	7,69	5,59	6,41
31,5	3,05	2,56	3,03	18,08	10,08	10,39
42,8	4,95	4,16	4,95	31,03	13,52	16,33



Obr. 5.7: Doba chladnutí na 600 °C pro vzorky A2, B a C

Doba ohřevu se pohybuje v rozmezí od 0,31 do 4,80 s a roste s rostoucí dávkou ozáření, tj. se snižující se procesní rychlostí při konstantním výkonu. Avšak především pro nižší dávky ozáření nejsou ve stanovené době ohřevu markantnější rozdíly. Doba chladnutí na referenční teplotu chladnutí 600 °C se pohybuje v podobném rozmezí od 0,64 do 4,95 s a opět roste se zvyšující se dávkou ozáření, jak je dobře patrné z grafu na Obr. 5.7. Doba chladnutí na referenční teplotu chladnutí 400 °C se pohybuje v rozmezí od 3,05 s do 31,03 s a vykazuje nejmarkantnější růst při vyšších dávkách ozáření, především u vzorku A.

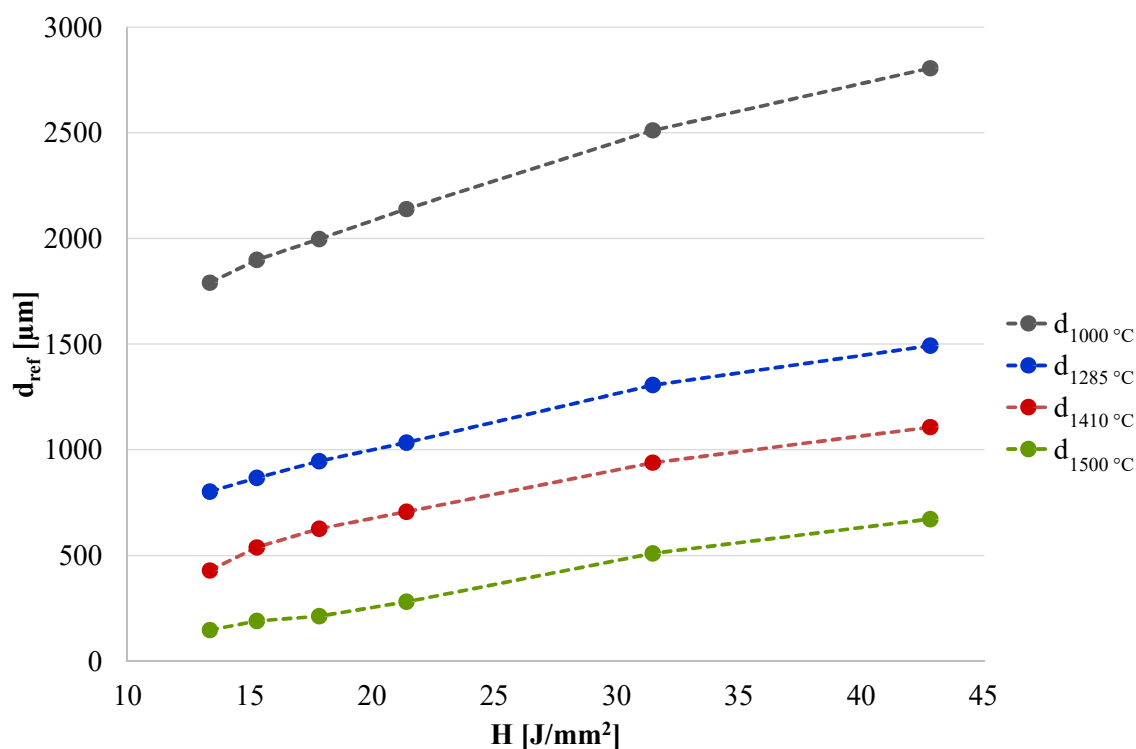
Dále je z uvedených výsledků patrné, že i rozměry vzorku mají vliv na dobu ohřevu a chladnutí, avšak znatelně menší než procesní parametry reprezentované dávkou ozáření. U vzorku A2 (S10/P0,4) s tenčím substrátem je patrný nárůst doby chladnutí oproti vzorku B (S20/P0,4) při vyšších dávkách ozáření, především při chladnutí na referenční teplotu 400 °C. Důvod prodloužení doby chladnutí je rychlejší ohřátí tenčího substrátu a tudíž zpomalení odvodu tepla z povlaku. Vzorek B (S20/P0,4) s tlustším substrátem chladne nejrychleji i pro vyšší dávky ozáření právě díky větší tepelné kapacitě substrátu. U vzorku C (S20/P0,1) s tlustší vrstvou povlaku je znatelné pomalejší chladnutí při nižších dávkách ozáření, při

kterých je natavena jen horní vrstva povlaku. Důvod pro toto zpomalení chladnutí je, že tlustší nepřetavený povlak působí jako tepelná bariéra pro odvod tepla z povrchu do substrátu.

Doba chladnutí na referenční teplotu 600 °C je vybrána pro následující analýzu s výsledky přetavení, protože vykazuje jasnou závislost na procesních parametrech. Doba chladnutí na nižší referenční teplotu chladnutí, 400 °C se ukazuje jako méně vhodná, protože tato referenční teplota chladnutí je blízko teplotě přehřevu vzorku a doba chladnutí může být ovlivněna postupným ohřátím vzorku při vyšších dávkách ozáření.

Šířka taveniny

Šířka taveniny je výsledkem analýzy rozměrů oblasti interakce laserového paprsku s povlakem, tj. oblasti taveniny. Analýza je prováděna z důvodu předpokládané úměry mezi rozměry tavné lázně na v rovině povrchu povlaku a směrem do hloubky, tj. hloubkou protavení. Vliv použitých procesních parametrů pro přetavení na šířku taveniny vyhodnocenou pro různou hodnotu referenční teploty taveniny je ukázán na příkladu pro vzorek A2 na Obr. 5.8.

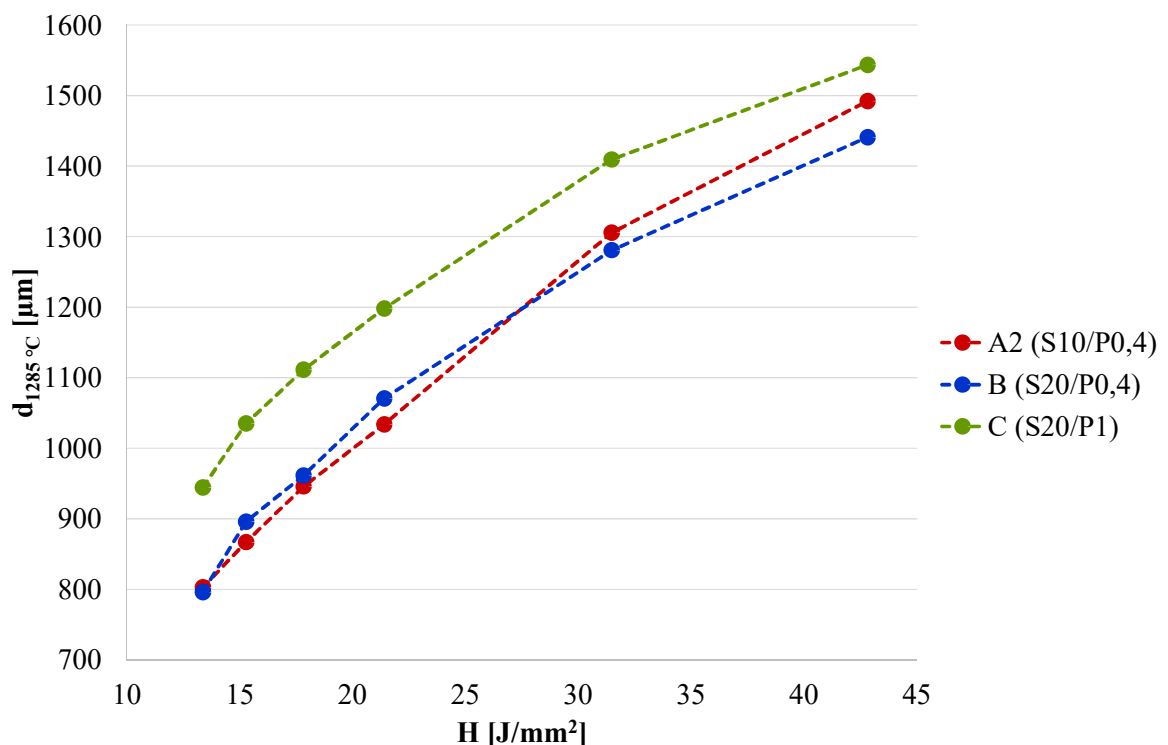


Obr. 5.8: Závislost šířky taveniny na procesních parametrech pro vzorek A2

Oblast taveniny se rozšiřuje se zvyšující se dávkou ozáření, tj. se snižující se procesní rychlostí při konstantním výkonu. Tudíž šířka taveniny spočtená pro jednu hodnotu referenční teploty taveniny roste se zvyšující se dávkou ozáření. Šířka taveniny $d_{1285\text{ °C}}$ začíná na $802\text{ }\mu\text{m}$ při dávce ozáření $13,4\text{ J/mm}^2$ a roste až na $1492\text{ }\mu\text{m}$ pro nejvyšší dávku ozáření $42,8\text{ J/mm}^2$. Nárůst je tedy téměř dvounásobný pro použitý rozsah procesních parametrů. Trend růstu šířky taveniny v závislosti na procesních parametrech je stejný i pro šířky taveniny vyhodnocené s jinou hodnotou referenční teploty taveniny.

S rostoucí hodnotou referenční teploty taveniny použité při vyhodnocení se šířka taveniny zmenšuje při konstantních procesních parametrech. Například při dávce ozáření $17,8\text{ J/mm}^2$ je hodnota šířky taveniny $d_{1000\text{ °C}} = 1997\text{ }\mu\text{m}$, $d_{1285\text{ °C}} = 946\text{ }\mu\text{m}$, $d_{1410\text{ °C}} = 627\text{ }\mu\text{m}$ a $d_{1500\text{ °C}} = 213\text{ }\mu\text{m}$. To odpovídá zužující se oblasti, kde je dosažena vyšší teplota, jak je vidět na průběhu teploty v oblasti působení laserového paprsku uvedeného dříve na Obr. 5.4.

Vliv tloušťky povlaku a substrátu vzorku na šířku taveniny je ukázán v následujícím grafu na Obr. 5.9, kde je zobrazena závislost šířky taveniny $d_{1285\text{ °C}}$ na procesních parametrech pro vzorky A2, B a C.



Obr. 5.9: Šířka taveniny $d_{1285\text{ °C}}$ pro vzorky A2, B a C

Vliv rozměrů vzorku na šířku taveniny je výrazně menší než vliv procesních parametrů, obdobně jako v případě dob ohřevu a chladnutí. Znatelný je vliv tloušťky povlaku, vzorek s tlustějším povlakem C (S20/P1) vykazuje pro stejné procesní parametry větší šířku taveniny než vzorek B (S20/P0,4). Povlak o větší tloušťce snižuje efektivitu odvodu tepla do substrátu a materiál má po delší dobu vyšší teplotu. Dále tenčí substrát vzorku A2 (S10/P0,4) je důvodem pro menší nárůst šířky taveniny oproti vzorku B (S20/P0,4) při vyšších dávkách ozáření, kdy tenčí substrát je více ohřátý a tím je opět snížena efektivita odvodu tepla z povrchové vrstvy do substrátu a tím dojde k rozšíření tavné lázně na povrchu.

Šířka taveniny vykazuje jasnou závislost na procesních parametrech nezávisle na hodnotě referenční teploty taveniny použité pro vyhodnocení. Šířka taveniny je proto následně vybrána pro další analýzu s dosaženými výsledky přetavení. Zvoleno je následně použití nižších hodnot referenční teploty taveniny, tj. 1285 °C a 1000 °C a to z důvodu, aby rozměry oblasti nebyly blízko limitu prostorového rozlišení kamery.

5.1.3. Korelace naměřených výstupů s hloubkou protavení

V následující části je analyzován vztah vybraných charakteristik procesu s dosaženou hloubkou protavení. Cílem analýzy bylo vybrat takový výstup měření, který bude vhodný k určování hloubky protavení přímo během procesu laserového přetavování.

Závislost na době chladnutí

Růst hloubky protavení je důsledkem zvyšujícího se množství tepla dodaného do vrstvy povlaku, tj. celkové dávky ozáření. Z důvodu uvolňování latentního tepla při tuhnutí většího objemu taveniny dochází k prodloužení doby chladnutí. Následně je proto analyzován vztah dosažené hloubky protavení a doby chladnutí na referenční teplotu chladnutí 600 °C.

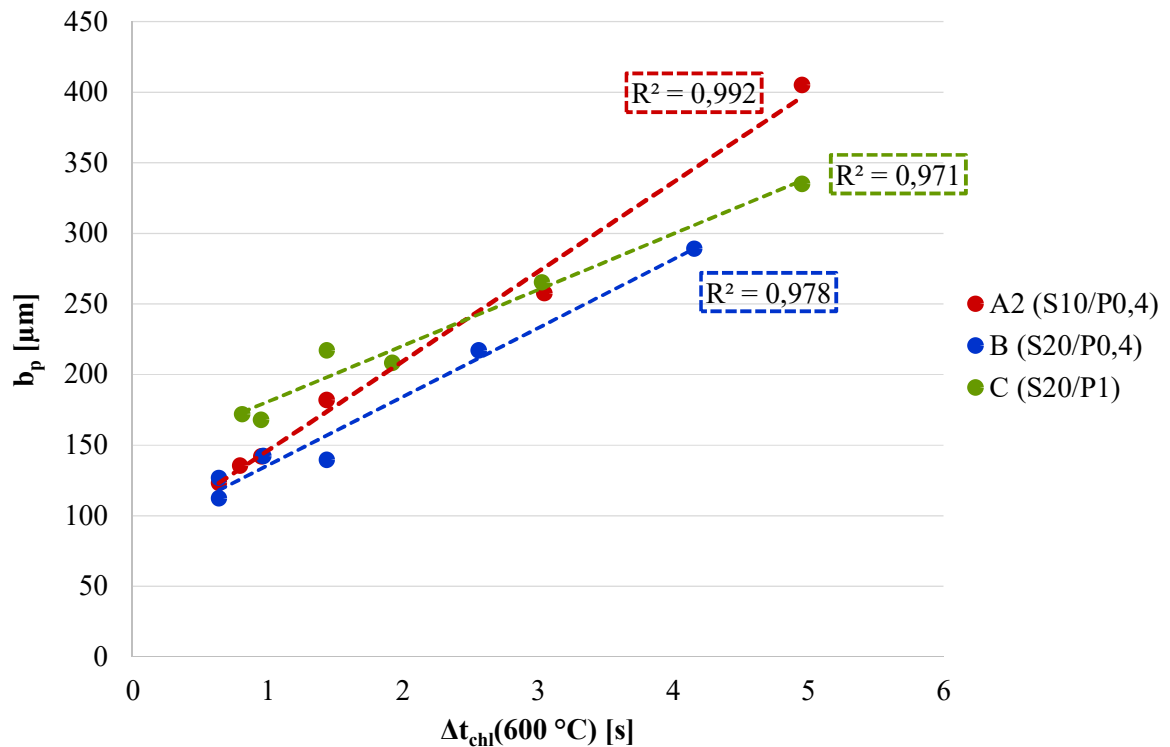
Závislost dosažené hloubky protavení na době chladnutí je aproximována lineární závislostí a ukázána na Obr. 5.10 pro vzorky A2, B a C. Výsledné rovnice lineární závislosti jsou

$$\text{pro vzorek A2:} \quad b_p = 63,4 \cdot \Delta t_{chl}(600 \text{ } ^\circ\text{C}) + 82,6, \quad (5.1)$$

$$\text{pro vzorek B:} \quad b_p = 48,7 \cdot \Delta t_{chl}(600 \text{ } ^\circ\text{C}) + 86,8, \quad (5.2)$$

pro vzorek C:

$$b_p = 40,0 \cdot \Delta t_{chl}(600 \text{ }^\circ\text{C}) + 141,4. \quad (5.3)$$

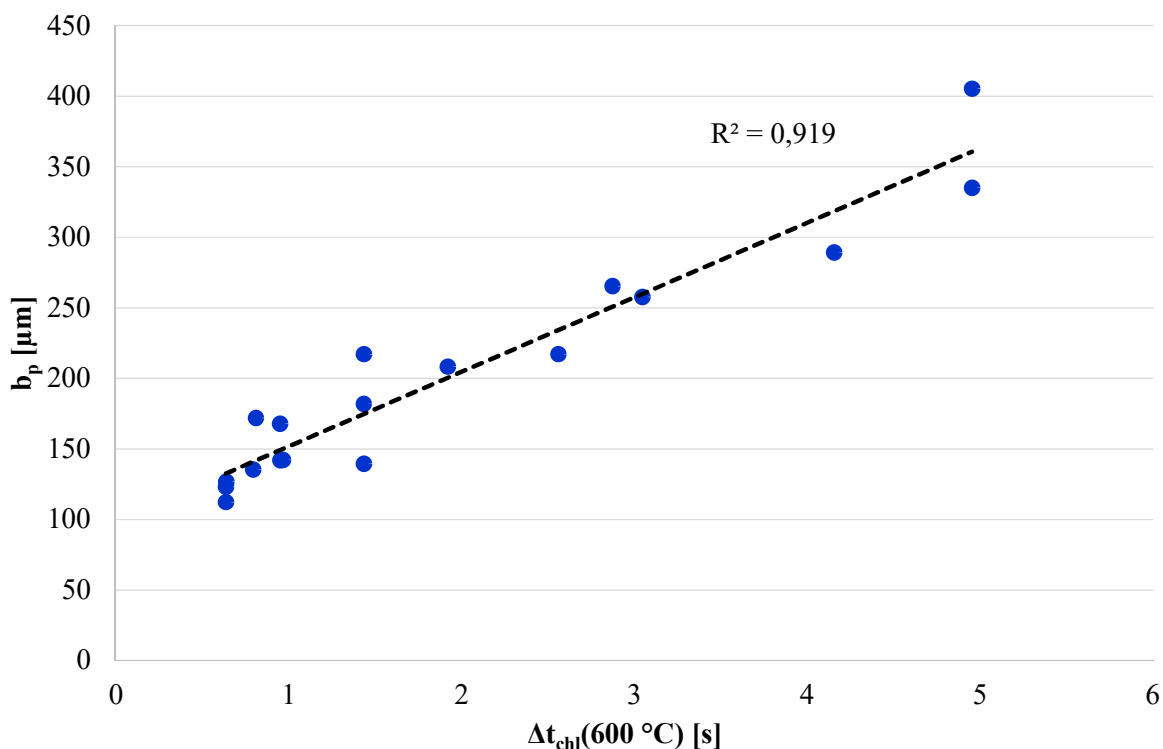


Obr. 5.10: Závislost hloubky protavení na době chladnutí pro jednotlivé vzorky

V rozsahu hloubek protavení dosažených během experimentů, tj. od 112 μm do 405 μm a rozsahu doby chladnutí $\Delta t_{chl}(600 \text{ }^\circ\text{C})$ od 0,64 s do 4,95 s dosahuje použitá lineární regrese pro jednotlivé vzorky vysokých koeficientů determinace, tj. $R^2 = 0,992$ pro vzorek A2, $R^2 = 0,978$ pro vzorek B, $R^2 = 0,967$ pro vzorek C. To znamená, že výpočet doby chladnutí lze použít pro stanovení dosažené hloubky protavení s vysokou přesností při přetavování vzorku se známou tloušťkou povlaku a substrátu. Jednotlivé směrnice lineárních závislostí pro použité vzorky jsou různé, tj. projeví se odlišná charakteristika chladnutí při různých tloušťkách povlaku a substrátu.

Následně je uvažována závislost hloubky protavení na době chladnutí nezávisle na tloušťce povlaku a substrátu, tj. nezávisle na přetavovaném vzorku. Závislost hloubky protavení na době chladnutí aproximována lineární závislostí pro všechny vzorky dohromady je ukázána na Obr. 5.11. Výsledná rovnice lineární regrese je:

$$b_p = 52,8 \cdot \Delta t_{chl}(600 \text{ }^\circ\text{C}) + 98,9. \quad (5.4)$$



Obr. 5.11: Závislost hloubky protavení na době chladnutí nezávisle na použitém vzorku

Výsledný koeficient determinace použité lineární regrese je $R^2 = 0,919$, nižší než jednotlivě pro každý vzorek, avšak stále poměrně vysoký. To znamená, že doba chladnutí je použitelná pro stanovení hloubky protavení i při přetavování dříve nevyzkoušené kombinaci tloušťky povlaku a substrátu nebo vzorku s proměnou tloušťkou povlaku a substrátu. Přesnost stanovení hloubky protavení je však v tomto případě nižší než v případě předem testované konfigurace rozměrů přetavovaného dílu.

Závislost na šířce taveniny

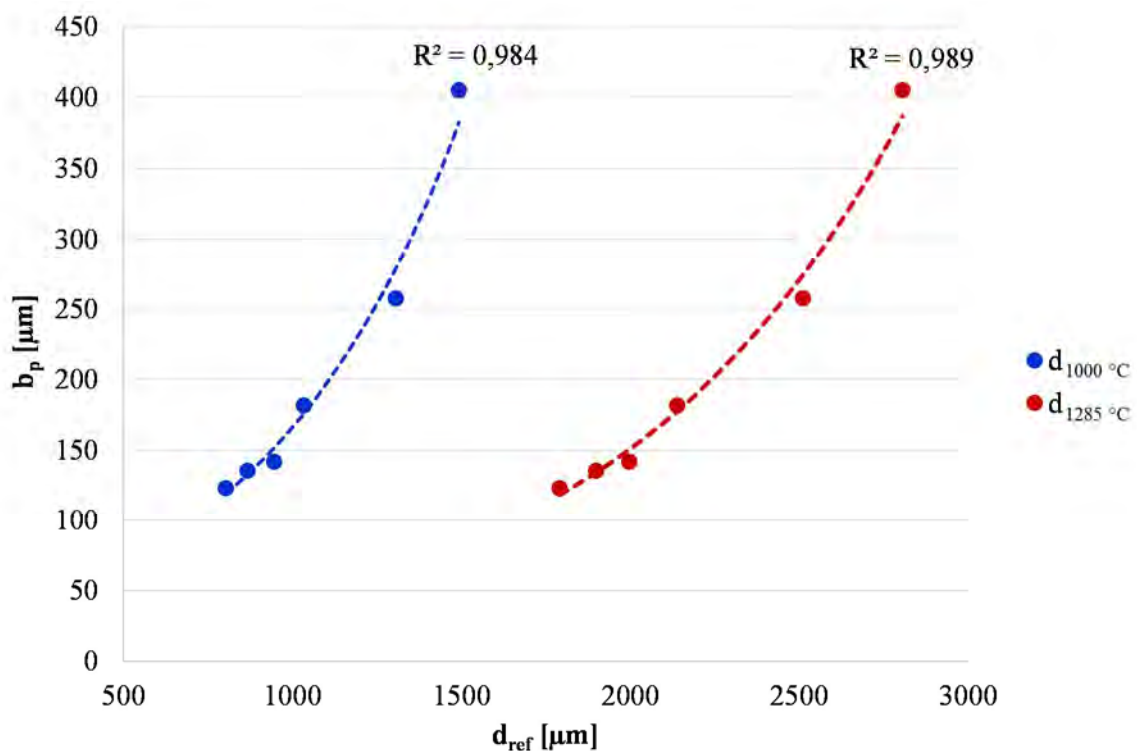
Během procesu přetavování je energie laserového záření absorbována na povrchu vzorku v místě působení laserového paprsku. Absorbované teplo je z místa působení rozváděno do zbytku vzorku dle principu vedení tepla. Teplo není do všech směrů rozváděno rovnoměrně. Vzhledem ke struktuře povlaku Stellitu vytvořeného žárovým nástřikem je jeho tepelná vodivost v jednotlivých směrech různá. Odvod tepla do hloubky je tak ovlivněn tloušťkou povlaku a dále teplotou a tepelnou kapacitou substrátu. Kdežto teplotní pole v rovině povrchu je ovlivněno ochlazováním povrchu okolním prostředím. Přesto mezi teplotním gradientem v obou směrech je očekávána určitá úměrnost. Proto je dále uvažován vztah mezi teplotním

polem na povrchu vzorku, tj. šířkou taveniny, s teplotní charakteristikou ve směru do hloubky vzorku, tedy hloubkou protavení.

Závislost hloubky protavení na šířce taveniny pro referenční teploty taveniny $T_{ref,t} = 1285\text{ °C}$ a $T_{ref,t} = 1000\text{ °C}$ aproximována exponenciální závislostí je pro vzorek A2 ukázána na Obr. 5.12. Výsledné rovnice exponenciální regrese jsou následující:

$$b_p = 30,69 \cdot e^{0,00169 \cdot d_{1285^\circ\text{C}}}, \quad (5.5)$$

$$b_p = 14,65 \cdot e^{0,00117 \cdot d_{1000^\circ\text{C}}}. \quad (5.6)$$



Obr. 5.12: Exponenciální závislost hloubky protavení na šířce taveniny $d_{1285\text{ °C}}$ a $d_{1000\text{ °C}}$

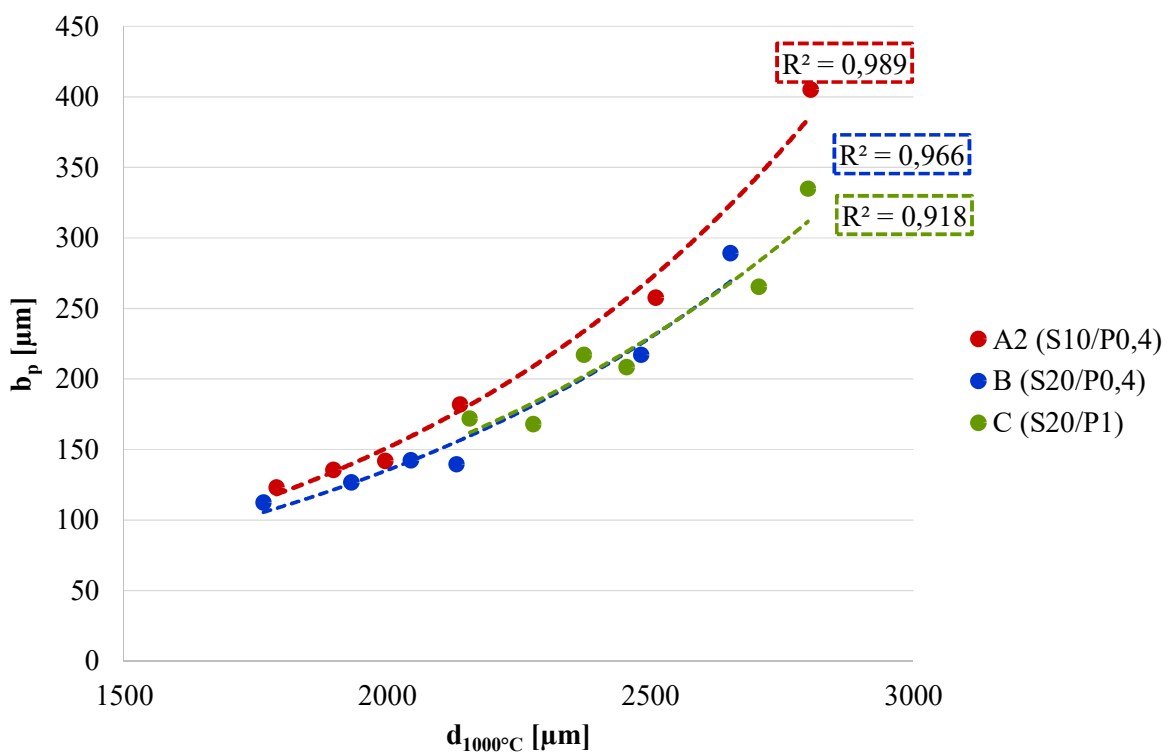
Pro vzorek A2 je dosažena hloubka protavení v rozsahu od 132 μm do 405 μm. Zvolená exponenciální závislost na šířce taveniny dosahuje vysokých koeficientů determinace pro obě zvolené hodnoty referenční teploty, tj. $R^2 = 0,984$ pro $d_{1285\text{ °C}}$ a $R^2 = 0,989$ pro $d_{1000\text{ °C}}$. Dosažený koeficient determinace je téměř stejný pro obě použité hodnoty referenční teploty pro stanovení šířky taveniny, jen nepatrně vyšší koeficient determinace byl dosažen v případě šířky taveniny $d_{1000\text{ °C}}$. To značí, že vyhodnocenou šířku taveniny lze použít ke stanovení

hloubky protavení s vysokou přesností i při různé hodnotě referenční teploty zvolené pro výpočet.

Pro další vzorky s různou tloušťkou povlaku a substrátu je závislost dosažené hloubky protavení na šířce taveniny $d_{1000^\circ\text{C}}$ aproximována exponenciální regresí zobrazena na Obr. 5.13. Rovnice jednotlivých závislostí pro vzorky B a C jsou

$$\text{pro vzorek B:} \quad b_p = 16,38 \cdot e^{0,00106 \cdot d_{1000^\circ\text{C}}} \quad (5.7)$$

$$\text{pro vzorek C:} \quad b_p = 18,00 \cdot e^{0,00102 \cdot d_{1000^\circ\text{C}}} \quad (5.8)$$



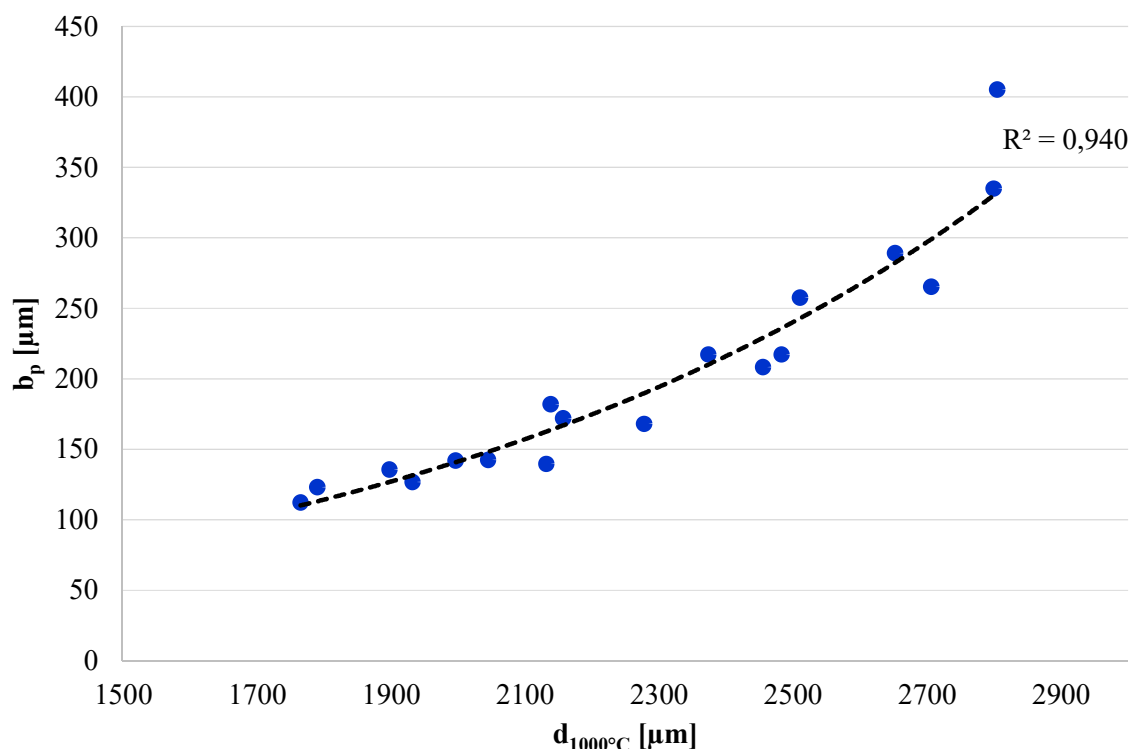
Obr. 5.13: Závislost hloubky protavení na šířce taveniny $d_{1000^\circ\text{C}}$ pro jednotlivé vzorky

V dosaženém rozsahu hloubky protavení dosahuje její exponenciální závislost na šířce taveniny $d_{1000^\circ\text{C}}$ vysokých koeficientů determinace pro vzorky A2 ($R^2 = 0,989$) a B ($R^2 = 0,966$) a nepatrně nižšího koeficientu determinace pro vzorek C ($R^2 = 0,918$). Nižší shoda u vzorku C je způsobena větší nepravidelností dosažené hloubky protavení. Pro vzorky B a C jsou koeficienty ve výsledné rovnici exponenciální regrese velmi blízké, tj. výsledná závislost má téměř stejný průběh v případě stejné tloušťky substrátu a rozdílné tloušťky

povlaku. U vzorku A2 s tenčím substrátem dochází se zvyšující se šířkou taveniny k většímu nárůstu hloubky protavení oproti vzorkům B a C.

Závislost hloubky protavení na šířce taveniny $d_{1000\text{ }^\circ\text{C}}$ aproximována exponenciální regresí nezávisle na geometrii vzorku, tedy pro vzorky A2, B a C dohromady, je ukázána na Obr. 5.14. Výsledná rovnice exponenciální regrese je:

$$b_p = 16,91 \cdot e^{0,00106 \cdot d_{1000\text{ }^\circ\text{C}}}. \quad (5.9)$$



Obr. 5.14: Závislost hloubky protavení na šířce taveniny $d_{1000\text{ }^\circ\text{C}}$ nezávisle na použitém vzorku

Exponenciální závislost hloubky protavení na šířce taveniny dosahuje vysokého koeficientu determinace, $R^2 = 0,940$, což značí vysokou shodu s naměřenými daty. To znamená, že při určování hloubky protavení pomocí spočtené šířky taveniny je dosaženo vysoké přesnosti i v případech změny geometrie přetavovaného dílu nebo při přetavování dílů s proměnnými rozměry.

Metoda stanovení šířky taveniny má výhodu, že vyhodnocení je prováděno pouze z pohyblivé kamery. Navíc při úpravě výpočtu by bylo možné šířku taveniny stanovit z kratšího časového

úseku či přímo z jednoho snímku. Při implementaci výpočtu do kontrolního softwaru pro termovizní kameru by bylo možné ji vyhodnocovat přímo během procesu přetavování. Díky tomu by bylo možné měření šířky taveniny snadno použít i pro případné řízení procesu.

5.1.4. Shrnutí analýzy procesu přetavování

V předcházející části byly na příkladech představeny hlavní výsledky metody charakterizace procesu přetavení povlaku Stellitu 6 a analyzován jejich vztah se zvolenými procesními parametry.

Nejprve byla ukázána závislost hloubky protavení na dávce ozáření, tj. na vstupních procesních parametrech. Při nízkých dávkách ozáření je ovlivněna jen povrchová vrstva, nejmenší dosažená hloubka protavení je 112 μm pro dávku ozáření 13,4 J/mm^2 u vzorku B. Dále při zvyšující se dávce ozáření dochází k růstu tloušťky ovlivněné vrstvy, při nejvyšší dávce ozáření 42,8 J/mm^2 je dosažena nejvyšší hloubka protavení. Při této dávce ozáření došlo u vzorku A k natavení rozhraní povlaku se substrátem a výsledná hloubka protavení je 405 μm .

Průběh teploty v místě působení byl vyhodnocen z měření NIR kamerou. V přední části oblasti interakce laserového působení laserového paprsku dochází k rychlému nárůstu teploty na maximální teplotu, která se pohybuje v rozsahu od 1550 až 1700 $^{\circ}\text{C}$, dále se nachází pruh taveniny. Se zvyšující se dávkou ozáření dochází k rozšiřování oblasti taveniny a spíše k menšímu nárůstu maximální teploty.

Následně byl představen vliv procesních parametrů na průměrné průběhy teplot pro bod v trajektorii přejezdu. Se zvyšující dávkou ozáření se zpomaluje průběh ohřevu a chladnutí. Z těchto průměrných průběhů byla stanovena doba ohřevu a chladnutí a jejich závislost na procesních parametrech. Se zvyšující se dávkou ozáření roste doba ohřevu z 0,3 s na 4,80 s, doba chladnutí $\Delta t_{\text{chl}}(600\text{ }^{\circ}\text{C})$ z 0,64 s na 4,95 s a doba chladnutí $\Delta t_{\text{chl}}(400\text{ }^{\circ}\text{C})$ z 3,05 s do 31,03 s. Rozměry vzorku mají na charakter chladnutí také vliv, avšak znatelně menší než procesní parametry přetavení. Vliv procesních parametrů na šířku taveniny, představující rozměry tavné lázně je významný. Se zvyšující se dávkou ozáření roste šířka taveniny, například $d_{1285\text{ }^{\circ}\text{C}}$ pro vzorek A2 začíná na 802 μm pro dávku ozáření 13,4 J/mm^2 a roste až na 1492 μm pro nejvyšší dávku ozáření 42,8 J/mm^2 . Stejný trend růstu je zaznamenán

nezávisle na hodnotě použité referenční teploty. Rozměry vzorku se projeví na šířce taveniny mnohem méně než procesní parametry.

Následně byla představena závislost dosažené hloubky protavení na vyhodnocených charakteristikách procesu. Lineární závislost hloubky protavení na době chladnutí $\Delta t_{chl}(600\text{ }^{\circ}\text{C})$ dosahovala pro jednotlivé vzorky vysoké shody s daty (koeficient determinace byl vyšší než 0,971). Nezávisle na rozměrech přetavovaného vzorku pak byl koeficient determinace nižší (0,919). Následně byla uvažovaná závislost hloubky protavení na šířce taveniny aproximována exponenciální regresí. Opět byl dosažen vysoký koeficient determinace. Například pro šířku taveniny $d_{1000\text{ }^{\circ}\text{C}}$ je dosažen koeficient determinace $R^2 = 0,940$ i nezávisle na rozměrech vzorku. Vysoký koeficient determinace značí, že obě vyhodnocené charakteristiky, dobu chladnutí i šířku taveniny, lze použít ke stanovení dosažené hloubky protavení během přetavení. Použitím šířky taveniny je možné dosáhnout přesnějších výsledků i v případě různé kombinace tloušťky substrátu a povlaku. Tedy při přetavování vzorku s předem neměřenými nebo proměnnými rozměry.

5.2. Zhodnocení navržené metody charakterizace

Druhá část výsledků hodnotí vyvinuté metody tepelné charakterizace procesu přetavení povlaků. Nejprve je analyzován vliv hlavních parametrů měření, tj. emisivity a prostorového a časového rozlišení. Dále je zhodnoceno navržené měřicí uspořádání a výsledný postup měření a další možnosti aplikace navržené metody.

5.2.1. Vliv emisivity na stanovení teplot

Hodnota emisivity použitá při vyhodnocení, respektive odchylka této hodnoty od skutečné emisivity povrchu, má na přesnost stanovení teploty největší vliv. Velikost tohoto vlivu se liší podle spektrálního rozsahu použité termovizní kamery. Chyba stanovení teploty může v LWIR pásmu vlnových délek dosahovat desítek procent, jak je ukázáno na příkladu v Tab. 5.4. V té je uveden rozdíl a procentuální odchylka stanovené teploty T_{det} od skutečné teploty měřeného objektu $T_{obj} = 1285\text{ }^{\circ}\text{C}$, pro různé kombinace reálné emisivity objektu ϵ_{obj} a emisivity zadané při vyhodnocení ϵ_{det} .

Tab. 5.4: Vyhodnocená teplota a odchylka od teploty objektu pro různé kombinace emisivity pro oblast LWIR vlnových délek

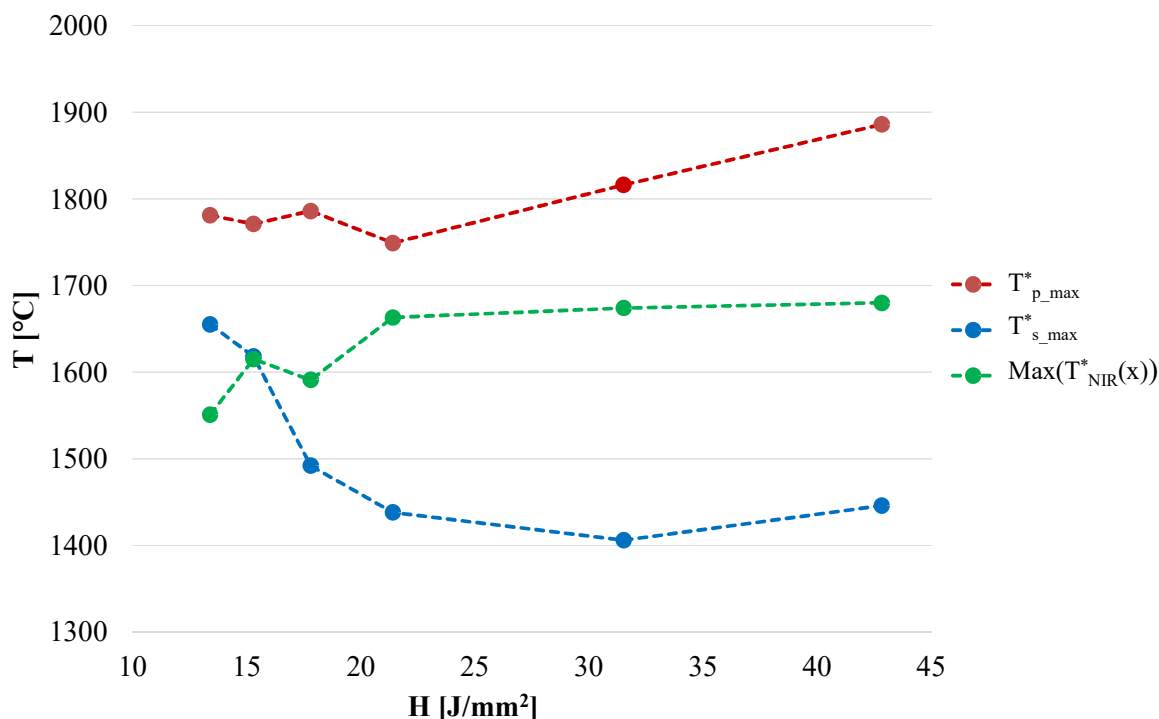
$T_{obj} = 1285 \text{ °C}$		ϵ_{det}			
		0,5		0,7	
ϵ_{obj}	0,5	1285 °C	x	990 °C	-22,99 %
	0,6	1484 °C	15,53 %	1140 °C	-9,29 %
	0,7	1681 °C	30,86 %	1285 °C	x

Při měření v NIR pásmu vlnových délek je chyba stanovení teplot v důsledku použití nesprávné emisivity řádově menší, než při měření v LWIR pásmu. Jako příklad je v Tab. 5.5 ukázáno, že odchylka stanovené teploty T_{det} od skutečné teploty objektu T_{obj} se pohybuje v řádu jednotek procent i při vyšších rozdílech mezi emisivitou použitou k vyhodnocení ϵ_{det} a skutečnou emisivitou objektu ϵ_{obj} . Použití NIR kamery je tak pro měření vysokých teplot vhodnější.

Tab. 5.5: Vyhodnocená teplota a odchylka od teploty objektu pro různé kombinace emisivity pro oblast NIR vlnových délek

$T_{obj} = 1285 \text{ °C}$		ϵ_{det}	
		1	
ϵ_{obj}	0,9	1267 °C	-1,37 %
	0,8	1248 °C	-2,86 %
	0,7	1227 °C	-4,51 %
	0,6	1203 °C	-6,36 %

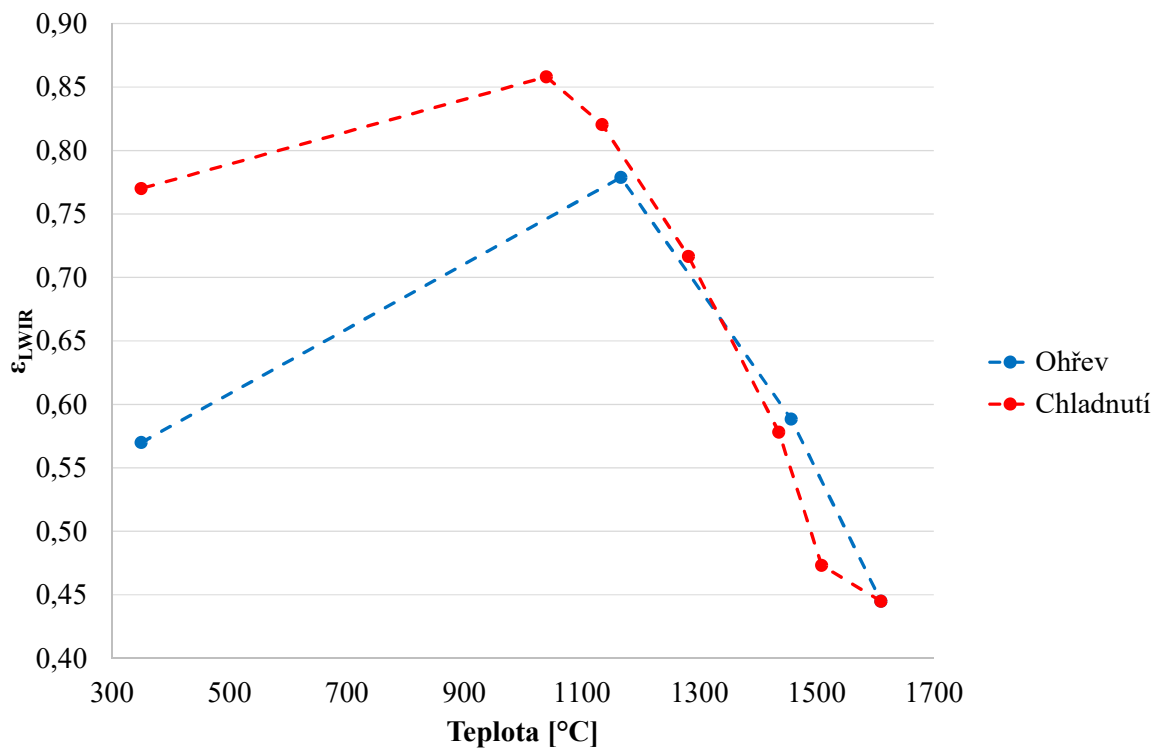
Vysoká chyba stanovení teploty vlivem emisivity v LWIR pásmu vlnových délek způsobila vysokou chybu stanovení teplot v oblasti taveniny při měření bez použití NIR kamery. Jako příklad je na Obr. 5.15 ukázáno porovnání vyhodnocené maximální teploty v tavenině z obou kamer při měření se dvěma LWIR kamerami a maximální teploty stanovené z průběhu $T_{NIR(x)}^*$ při měření s NIR kamerou.



Obr. 5.15: Vývoj maximální teploty v oblasti taveniny v závislosti na dávce ozáření stanovený LWIR kamerami a NIR kamerou

Maximální teploty v oblasti taveniny vyhodnocené pomocí pohyblivé LWIR kamery $T_{p_max}^*$ a statické LWIR kamery $T_{s_max}^*$ se liší až o 440 °C, i když by si měly vzájemně odpovídat. Teplota $T_{p_max}^*$ se pohybuje v rozmezí 1780 – 1900 °C a se zvyšující dávkou ozáření se zvyšuje. Naopak teplota $T_{s_max}^*$ s rostoucí dávkou ozáření klesá z 1655 °C k 1440 °C. Pro srovnání maximální teplota průměrného průběhu teploty $T_{NIR}^*(x)$ se při stejných parametrech přetavení pohybuje v rozmezí od 1550 do 1680 °C.

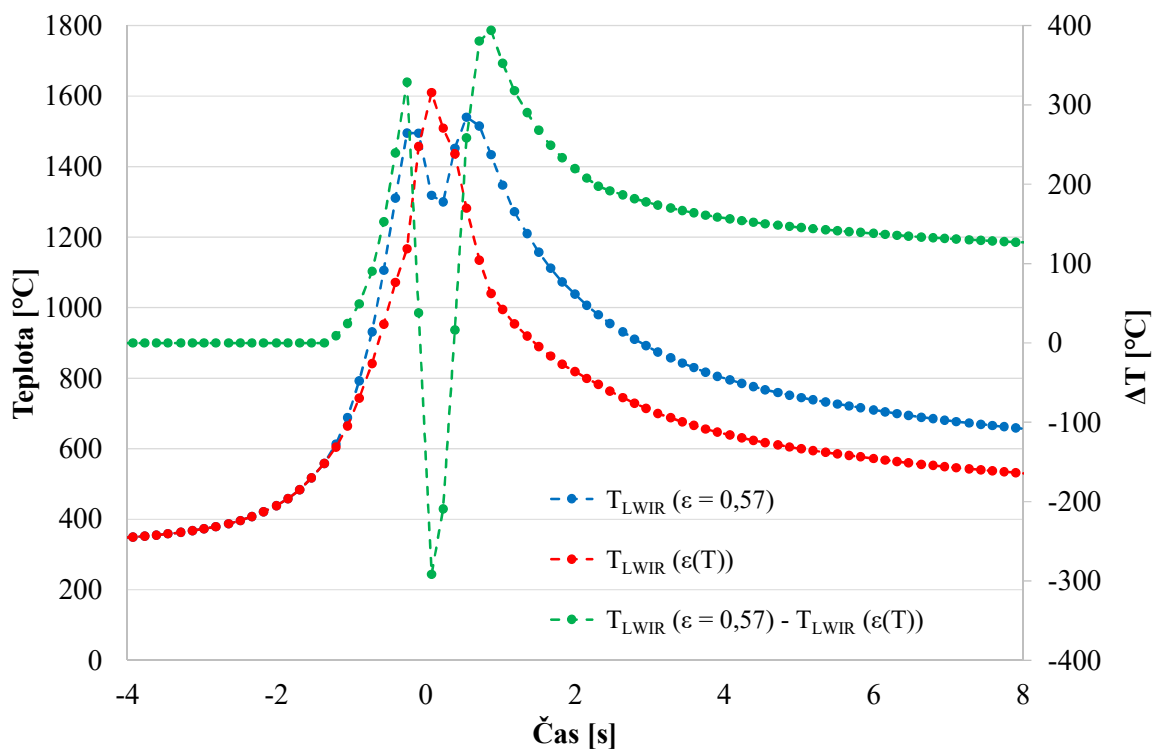
Pro vyhodnocení je proto využita vyšší přesnost stanovení teplot při měření s NIR kamerou ke stanovení emisivity pro LWIR kamery, jak je popsáno v kapitole 4.4.4. Počáteční a koncový bod představuje emisivita stanovená při teplotě předehřevu před a po přetavení a to pomocí referenční barvy. V rozsahu teplot nad 1000 °C je emisivita stanovena pomocí NIR kamery. Výsledkem tohoto postupu je stanovení průběhu emisivity během celého procesu přetavení, tj. závislost emisivity na teplotě. Jako příklad je na Obr. 5.16 ukázána závislost emisivity ϵ_{LWIR} na teplotě stanovená při přetavení vzorku A (S10/P0,4) procesními parametry s celkovou dávkou ozáření 42,8 J/mm².



Obr. 5.16: Závislost emisivity ϵ_{LWIR} na teplotě při ohřevu a chladnutí povlaku

Při ohřevu s rostoucí teplotou emisivita roste z 0,57 při teplotě 350 °C na 0,78 při teplotě 1170 °C. S dalším růstem teploty při vzniku taveniny na povrchu pak emisivita klesá a to postupně až na 0,45 při 1610 °C. S poklesem teploty při opětovném tuhnutí taveniny emisivita opět narůstá až na hodnotu 0,86 při 1040 °C. Od této teploty pak s dalším snižováním teploty dochází k poklesu emisivity na 0,77. Emisivita přetaveného povlaku je tak podstatně vyšší než emisivita původního povrchu.

Uvažování této závislosti emisivity vede ke značnému zvýšení přesnosti stanovení teploty. Na Obr. 5.17 je ukázán rozdíl při vyhodnocení s konstantní a teplotně závislou emisivitou v průběhu teplot při přetavení vzorku A (S10/P0,4) procesními parametry s celkovou dávkou ozáření 42,8 J/mm².



Obr. 5.17: Rozdíl v průběhu teploty T_{LWIR} při použití konstantní emisivity a emisivity závislé na teplotě

Rozdíl v průběhu teplot je patrný především ve vysokých teplotách v oblasti taveniny. Průběh teploty vyhodnocený s konstantní emisivitou ukazuje místo maxima teploty náhlý pokles teploty do lokálního minima a její opětovný nárůst. Při použití teplotně závislé emisivity je již průběh teploty v tavenině zobrazen správně. Rozdíl ve vyhodnocených teplotách se pohybuje v rozsahu od -300 do 400 °C.

Další rozdíl je v oblasti chladnutí po přetavení povlaku. Pokud je použita nesprávná emisivita pro stav před přetavením, vyhodnocená teplota je vyšší než teplota vyhodnocená se správnou hodnotou emisivity pro přetavený povlak. Rozdíl vyhodnocených teplot v oblasti chladnutí se pohybuje kolem 100 °C.

Vliv stanovených teplot na dobu ohřevu a chladnutí

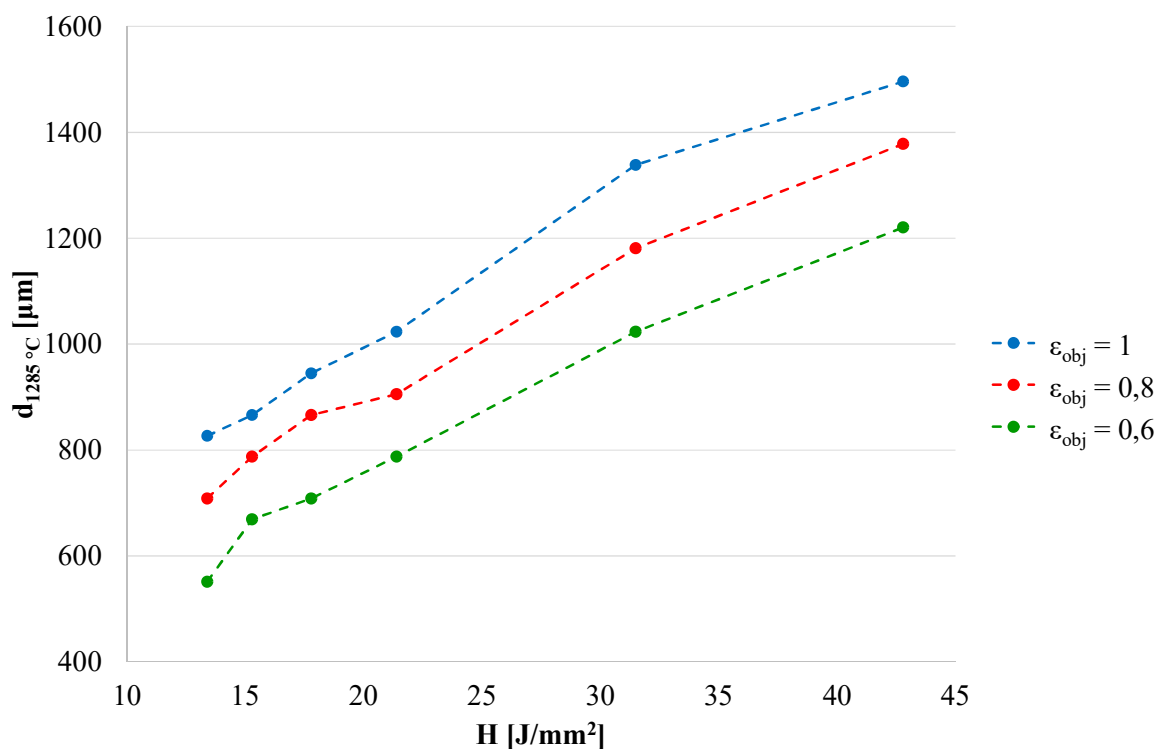
Doby ohřevu a chladnutí jsou stanoveny z výsledných teplotních průběhů. Chyby ve stanovení průběhu teplot vlivem použití nesprávné emisivity se tak projeví při vyhodnocení doby ohřevu či chladnutí. Při použití nesprávné hodnoty emisivity je špatně určen čas, kdy byla dosažena referenční teplota T_{ref} pro určení doby chladnutí. Například při přetavení vzorku A (S10/P0,4)

procesními parametry s celkovou dávkou ozáření $42,8 \text{ J/mm}^2$ je doba chladnutí na referenční teplotu $600 \text{ }^\circ\text{C}$ vyhodnocená z teplotního průběhu s teplotně závislou emisivitou $4,95 \text{ s}$. Avšak při použití konstantní emisivity $0,57$ by byla vyhodnocena doba $11,7 \text{ s}$. Rozdíl je tak více než dvojnásobný.

Dále použitá hodnota či funkce emisivity ovlivňuje stanovení času, kdy byla dosažena maximální teplota. Při použití konstantní emisivity je místo maxima funkce lokální minimum.

Vliv stanovení teplot na šířku taveniny

Šířka taveniny je stanovena z teplotních průběhů napříč oblastí interakce získaných vyhodnocením záznamu pohyblivé NIR kamery. Při tomto vyhodnocení byla použita konstantní emisivita $\epsilon_{\text{det}} = 1$. Ve skutečnosti je emisivita ϵ_{obj} nižší. Vliv emisivity na stanovení šířky taveniny je ukázán na příkladu vzorku A (S10/P0,4) na Obr. 5.18 pro různé procesní parametry laserového přetavení.



Obr. 5.18: Šířka taveniny $d_{1285 \text{ }^\circ\text{C}}$ vyhodnocená pro nižší hodnoty emisivity objektu ϵ_{obj} v závislosti na procesních parametrech přetavení

Při snižující se emisivitě objektu ϵ_{obj} se šířka taveniny pro stejné procesní parametry $d_{1285 \text{ }^\circ\text{C}}$ snižuje. Avšak trend závislosti šířky taveniny na procesních parametrech je i přes změnu

emisivity stejný. Díky tomu zůstane stejný i trend závislosti dosažené hloubky protavení na vyhodnocené šířce taveniny.

5.2.2. Vliv prostorového rozlišení kamer

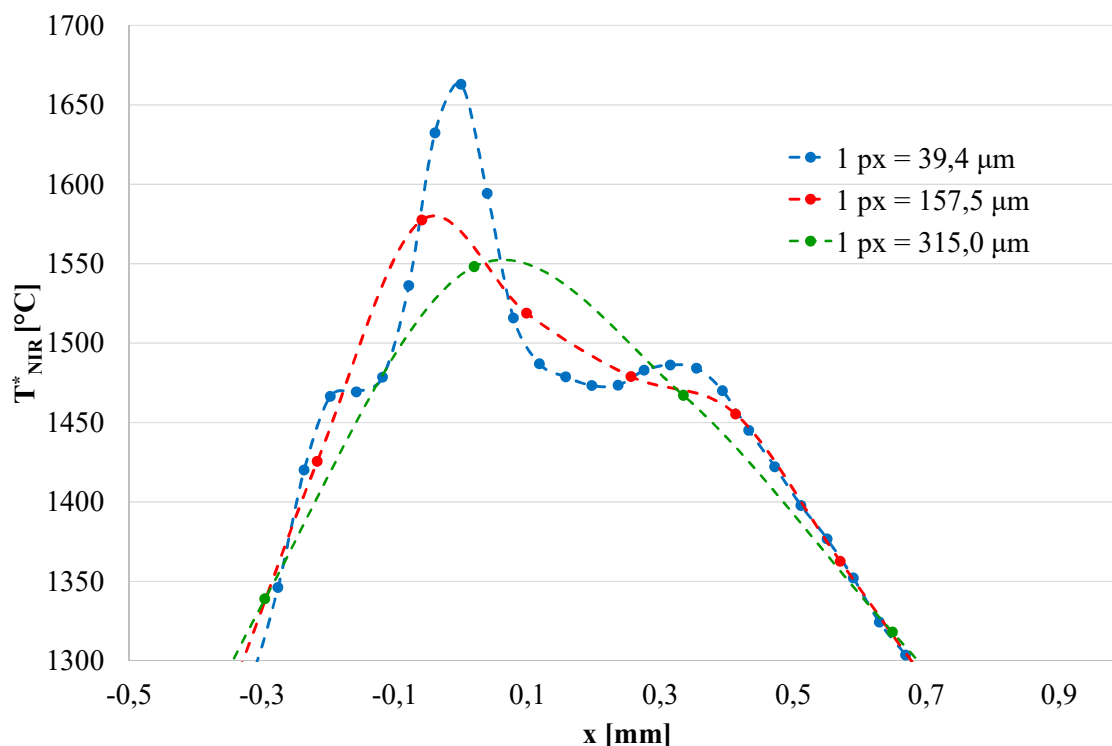
Dalším faktorem určujícím přesnost stanovení teplot a teplotních průběhu a z nich odvozených veličin je prostorové rozlišení kamer při měření, především pak pohyblivé kamery určené k analýze teplot v oblasti interakce laserového paprsku s povrchem.

Prostorové rozlišení pohyblivé kamery je též určující pro přesnost stanovení šířky taveniny. Předpokládá se, že změny šířky taveniny při změně procesních parametrů budou řádově stejné, jako změny dosažené hloubky protavení. Ty se pohybují v řádu jednotek až desítek mikrometrů. Pro dosažení nejvyššího prostorového rozlišení pro pohyblivou NIR kameru tak byl použit teleskopický objektiv a umístění kamery co nejbližší měřenému objektu. Výsledné dosažené rozlišení je $1 \text{ px} = 39,4 \text{ } \mu\text{m}$.

Prostorové rozlišení je v podstatě nejmenší dílek stupnice při určování šířky taveniny. Prostorovému rozlišení $1 \text{ px} = 39,4 \text{ } \mu\text{m}$ tak odpovídá střední absolutní chyba stanovení šířky taveniny v dílčím průběhu teplot $\pm 12 \text{ } \mu\text{m}$. Pro další snížení této chyby je výsledná šířka taveniny stanovena aritmetickým průměrem z 30 vyhodnocených hodnot.

Nejmenší zaznamenaný nárůst šířky taveniny při navýšení dávky ozáření je $22 \text{ } \mu\text{m}$, nejčastěji se nárůst šířky taveniny při nižších dávkách ozáření pohybuje v intervalu cca $40 - 80 \text{ } \mu\text{m}$. Zvolené rozlišení je tak dostatečné pro stanovení šířky taveniny. Snížení rozlišení by již znamenalo snížení přesnosti určení šířky taveniny.

Díky vyššímu rozlišení pohyblivé kamery je též možné detailněji stanovit průběh teplot v oblasti taveniny. Při nižším rozlišení by průběh teplot byl značně zkreslený, jak je naznačeno na Obr. 5.19, kde je znázorněn simulovaný vliv snížení prostorového rozlišení na stanovený průběh teploty T_{NIR}^* .



Obr. 5.19: Průběh vyhodnocené teploty T_{NIR}^* v závislosti na prostorovém rozlišení kamery

Při snížení prostorového rozlišení se ve stanoveném průběhu teploty $T_{NIR}^*(x)$ postupně ztrácí detaily rozložení teplot v oblasti taveniny. Vzhledem k průměrování teploty z větší oblasti do jednoho pixelu se sníží i vyhodnocená maximální teplota.

Nižší prostorové rozlišení bylo jednou z příčin nepřesného určení teploty v oblasti interakce při měření se dvěma LWIR kamerami. V tomto případě bylo dosažené rozlišení obou kamer $1 \text{ px} > 250 \text{ } \mu\text{m}$. Vyhodnocené průměrné teploty v oblasti taveniny $T_{p_pr}^*$ a $T_{s_pr}^*$ se pohybovaly v rozmezí od 1100 do 1300 °C, což je nižší než teplota tavení Stellitu 6. Vzhledem k nedostatečnému prostorovému rozlišení kamer byla průměrná teplota stanovena i z okolí oblasti taveniny a tedy nižší než skutečná teplota přímo v oblasti taveniny.

5.2.3. Vliv časového rozlišení měření

Na výsledcích měření a přesnosti jejich vyhodnocení se též podílí časové rozlišení měření. Analyzován je vliv zvolené frekvence snímání jednotlivých kamer.

U pohyblivé NIR kamery je vyhodnocení prováděno z deseti vybraných snímků časově rovnoměrně rozdělených po dobu přetavení jedné stopy. Stopy byly dlouhé 90 mm a nejvyšší

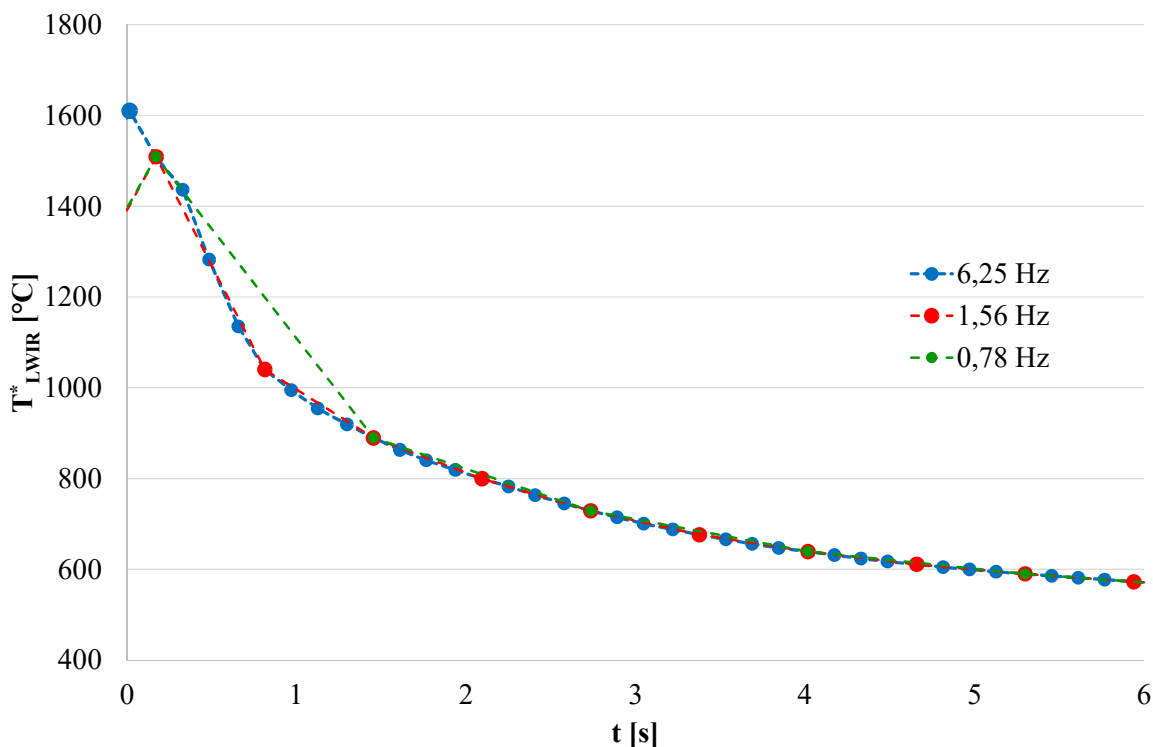
použitá rychlost posunu laserového svazku po povrchu je 40 cm/min. K získání deseti snímků je tak postačující frekvence vyšší než 1 Hz. Použitá byla frekvence vyšší, 10 Hz, z důvodu umožnění případné analýzy i z kratších úseků.

Důležitější je frekvence u statické kamery, která určuje, s jakým časovým rozlišením je získána teplota $T^*_{LWIR}(t)$, tj. průměrný průběh teploty během zpracování a ze které jsou následně stanovovány rychlosti ohřevu a chladnutí. Frekvence statické kamery tak bude určovat chybu stanovení těchto veličin. Zároveň je však nutné zvolit frekvenci s ohledem na záznam celého procesu přetavení všech vzorků, neboť při vyšší vzorkovací frekvenci je totiž při delším záznamu omezená možnost ukládání dat. Dále vyšší množství zaznamenaných dat znamená časově náročnější vyhodnocení.

Na základě předchozích experimentů se předpokládá, že rychlosti ohřevu a chladnutí budou začínat řádově na desetinách sekund. Zvolená frekvence tak musí umožnit řádově menší chybu stanovení těchto veličin, aby bylo možné vyhodnocené veličiny porovnat při změně procesních parametrů přetavení. Zvolená frekvence pro statickou kameru FLIR A615 byla 6,25 Hz, při které je chyba stanovení doby ohřevu a chladnutí $\pm 0,07$ s. Při snížení frekvence záznamu na polovinu, tj. na 3,125 Hz by vzrostla chyba stanovení doby ohřevu a chladnutí na $\pm 0,14$ s, tedy již řádově stejná jako očekávané doby ohřevu a chladnutí.

Nejmenší vyhodnocená hodnota je 0,31 s, tedy doba ohřevu vzorku A2(S10/P0,4) při dávce ozáření $H = 42,8 \text{ J/mm}^2$. Dále nejmenší zaznamenaný nárůst doby ohřevu při zvýšení dávky ozáření je 0,15 s. Výsledná chyba měření je tedy menší a je možné porovnat hodnoty při změně procesních parametrů přetavení.

Vyhodnocený průběh teploty ze statické kamery má vypovídat o charakteru ohřevu a chladnutí, nemá za cíl zaznamenat detaily v oblasti taveniny. Použitá vzorkovací frekvence tak musí být dostatečná pro zobrazení těchto průběhů, kde však nejsou očekávány náhlé výkyvy teplot. Na Obr. 5.20 je ukázán simulovaný vliv snižující se vzorkovací frekvence na rozlišení stanoveného průběhu teploty $T^*_{LWIR}(t)$ při přetavení vzorku A(S10/P0,4) a procesních parametrech s celkovou dávkou ozáření $H = 42,8 \text{ J/mm}^2$.



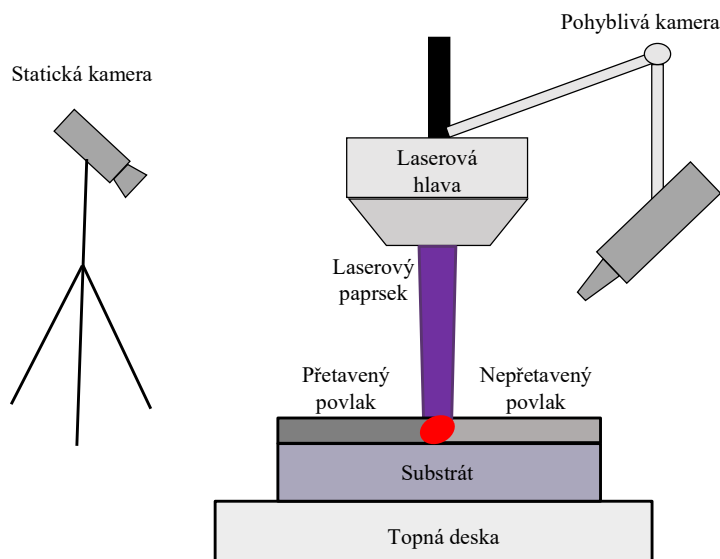
Obr. 5.20: Průběh teploty $T^*_{LWIR}(t)$ při různé vzorkovací frekvenci

Při nízké frekvenci 0,78 Hz by vzhledem k nedostatku dat došlo ke zkreslení křivky chladnutí. Při frekvenci 1,56 Hz je již průběh chladnutí zobrazen poměrně přesně, avšak je možné, že při této frekvenci nebude ve sledovaném bodě zachycen přesně pohyb laserového paprsku a z toho důvodu by nebylo zaznamenáno dosažené maximum. Při použité vzorkovací frekvenci 6,25 Hz je již průběh chladnutí zobrazen dostatečně detailně.

5.2.4. Uspořádání a použití měřicího systému

Navržené měřicí uspořádání

Jedním z dílčích cílů této práce bylo navrhnout vhodné uspořádání pro charakterizaci procesu laserového přetavení povlaků za využití termovizních kamer. Výsledné uspořádání využívá kombinace dvou typů kamer a je ukázáno na Obr. 5.21. Detailní popis uspořádání je v kapitole 4.4.1 části Metody zpracování.



Obr. 5.21: Navržené měřicí uspořádání pro tepelnou charakterizaci procesu laserového přetavení

První kamera je upevněna přímo k laserové hlavě, tudíž se pohybuje přímo s ní a je tak označována jako pohyblivá kamera. Tato kamera detailně snímá oblast interakce laserového paprsku s povlakem. Díky zvolenému umístění je tato oblast interakce laserového svazku s povrchem na termogramu vždy na stejném místě. Lze tedy snadno vyhodnocovat rozložení a průběh teplot v této oblasti. Vhodné je použít u této kamery teleskopický objektiv a dosáhnout tak vysokého prostorového rozlišení v analyzované oblasti. S ohledem na převažující vysokoteplotní účel je vhodné použít NIR kameru, kde je dosaženo vyšší přesnosti stanovení teplot i při vysoké nejistotě hodnoty emisivity.

Druhá kamera, označována jako statická, je umístěná na stativu a snímá celý zpracovávaný vzorek. Toto uspořádání umožňuje vyhodnocovat časový průběh teplot ve zvolených oblastech během celého procesu a v libovolném místě vzorku. S ohledem na požadavek měření teplot v celém rozsahu ohřevu a přetavování je vhodné použít LWIR kameru.

Díky zvolenému uspořádání je tak proces laserového přetavení povlaku vhodně zaznamenán a umožňuje provádět detailní analýzu teplot jak v oblasti interakce laserového paprsku s materiálem tak v libovolném bodě na zpracovávaném vzorku.

Postup použití výsledné metody

Stručný postup aplikace výsledné metody tepelné charakterizace procesu přetavení je následující:

- 1) Uspořádání měřicího systému se statickou kamerou zabírající celý vzorek a pohyblivou kamerou s teleskopickým objektivem zaměřenou na oblast interakce laserového povlaku s materiálem.
- 2) Nanesení termovizní barvy se známou emisivitou na okrajové části vzorku.
- 3) Předehřev vzorku na počáteční teplotu, spuštění záznamu kamer a následně provedení přetavení povlaku. Ukončení záznamu po dokončení přetavení s ustálením na koncové teplotě.
- 4) Vyhodnocení průměrných teplotních průběhů z obou kamer při nastavení emisivity na 1.
- 5) Stanovení teplotní závislosti emisivity pro LWIR kameru, pro nízké teploty za využití termovizní barvy, pro vysoké teploty porovnáním s teplotním průběhem z NIR kamery.
- 6) Použití stanoveného průběhu emisivity pro nové vyhodnocení z LWIR kamery, tj. získání finálního teplotního průběhu během procesu.
- 7) Stanovení doby chladnutí z teplotního průběhu statické kamery, stanovení šířky taveniny z teplotního průběhu pohyblivé kamery

6. Závěr

Disertační práce se zabývala vývojem nové bezkontaktní měřicí metody vhodné pro charakterizaci tepelných procesů probíhajících při laserovém přetavování žárově stříkaných povlaků. Pozornost byla dále věnována analýze vzájemných vztahů mezi výsledky měření, vstupními procesními parametry laserového přetavení a výsledným stavem povlaku po přetavení.

Výsledkem je návrh a realizace metody, která využívá kombinace dvou termovizních kamer. První kamera detailně snímá oblast interakce pohybujícího se laserového paprsku s povlakem. S ohledem na převažující vysokoteplotní účel je použita NIR kamera charakteristická vyšší přesností stanovení vysokých teplot. Druhá kamera zabírá celý zpracovávaný vzorek. Tím je umožněno vyhodnocovat časový průběh teplot ve zvolených oblastech během celého procesu a v libovolném místě vzorku. S ohledem na požadavek měření teplot v celém rozsahu ohřevu a ochlazování je použita LWIR kamera.

Součástí vyvinuté metody jsou i jednotlivé postupy vyhodnocení naměřených dat. Výstupem při aplikaci na laserové přetavování jsou:

- průměrné rozložení teplot v oblasti taveniny,
- průměrný průběh teploty v čase během zpracování pro libovolný bod na povrchu,
- doby ohřevu a chladnutí reprezentující tepelnou dynamiku procesu,
- šířka taveniny reprezentující rozměry tavné lázně,
- teplotní závislost emisivity pro LWIR pásmo vlnových délek.

Funkčnost navržené metody byla ověřena v experimentech s laserovým přetavováním povlaku Stellitu 6. Výsledkem jsou teplotní charakteristiky procesu přetavení v závislosti na vstupních technologických parametrech. Vyhodnocena byl dále vztah dosažené hloubky protavení s jednotlivými výstupy měřicí metody. Vysokou shodu modelu s daty vykazují lineární závislost hloubky protavení na době chladnutí a exponenciální závislost hloubky protavení na šířce taveniny. Díky tomu lze tuto bezkontaktní metodu měření použít při laserovém přetavování ke stanovení dosažené hloubky protavení bez nutnosti podrobovat díly destruktivní analýze. Využitím vyhodnocené šířky taveniny je možné určovat hloubku protavení s vysokou přesností i při přetavování reálných dílů s předem neměřenými nebo proměnnými rozměry.

Vyvinutá metoda by měla být snadno použitelná i při přetavování dalších druhů povlaků nebo i v podobných aplikacích laserového přetavení povrchu. Metodu by mělo být možné využít i při přetavení s jiným technologickým vybavením, než je použito při vývoji metody v této práci, tj. například s jiným typem laseru.

Výsledná metoda je nadále používána při experimentech laserového přetavení. Práce se zaměřují především na použití této metody pro další druhy povlaků vytvářených metodami žárových nástřiků.

Shrnutí

Disertační práce je zaměřena na vývoj nové metody měření procesu laserového přetavování žárově stříkaných povlaků s využitím termovizních kamer. Jejím výsledkem je návrh vhodného experimentálního uspořádání, postup měření a jeho vyhodnocení, analýza vztahů mezi výsledky měření, procesními parametry přetavení a hloubkou protavení.

Přehled současného stavu problematiky shrnuje především poznatky o využití laserů k přetavování žárově stříkaných povlaků. Jsou uvedeny možné metody přetavování, přetavované materiály a vlastnosti povlaků po přetavení. Další část je věnována použití metod charakterizace tepelných procesů v technologiích laserového zpracování povrchu materiálů. Pozornost je věnována především bezkontaktnímu měření teplot a použití termovizních kamer.

Následují cíle disertační práce, kterými jsou návrh a vývoj nové metody měření procesu přetavení žárově stříkaných povlaků a způsobu vyhodnocení měření. Dále pak ověření funkčnosti metody při přetavení povlaků a analýza vztahů mezi naměřenými výsledky, procesními parametry přetavení a dosaženou hloubkou protavení.

V kapitole metody zpracování jsou uvedeny detaily o použitém laserovém systému, zvolených technologických parametrech a vzorcích. Dále jsou popsány použité termovizní kamery a následně pak postup vývoje metody měření, jednotlivé varianty metody včetně uspořádání během experimentu a postupů vyhodnocení měření.

V části výsledky jsou nejprve uvedeny výsledky přetavení povlaku Stellitu 6, především vývoj hloubky protavení v závislosti na parametrech přetavení. Dále jsou uvedeny teplotní charakteristiky procesu přetavení a analyzován jejich vztah s procesními parametry a následně s dosaženou hloubkou protavení. Následuje diskuze k hlavním jevům ovlivňující výsledky měření a nakonec je uvedeno zhodnocení vyvinuté metody a zobecněný postup její aplikace.

Práce byla řešena v rámci studijního programu Fyzika plazmatu a tenkých vrstev na Katedře fyziky Fakulty aplikovaných věd ve spolupráci s odborem Termomechanika technologických procesů vysokoškolského ústavu Nové technologie – výzkumné centrum.

Resumé

PhD thesis is focused on the development of a new method for measuring thermal processes in laser remelting of thermally sprayed coatings by using infrared cameras. The result of the thesis is a design of the suitable experimental setup, the advancement of measurement and its evaluation, analysis of relations among measurements outcome, process parameters of laser remelting and achieved depth of remelting.

The chapter literature review summarizes the knowledge of utilization lasers for remelting of the thermally sprayed coating. Possible methods of remelting, materials of remelted coating and properties of coatings after remelting are introduced. Next part is dedicated to methods utilized for characterization of thermal processes in laser surface treatment processes. Attention is paid in particular to contactless methods of temperature measurement and utilization of infrared cameras.

In the next part, the goals of the PhD thesis are defined and these are the design and development of a new method for measuring laser remelting of thermally sprayed coating and methods of evaluating measurement. Further goals are verifications of developer method functionality during remelting of coatings and analysis of relations among measurements outcome, process parameters of laser remelting and achieved depth of remelting.

In the methods section, there is description of utilized laser systems, selected processing parameters and used samples. Next, the used infrared cameras are described as well as the advancement of development of a new method of measurement, individual variants of the method including experimental arrangements and evaluations procedures.

In the chapter results and discussion, there are shown outcomes of remelting the Stellite 6 coating, primarily the development of the depth of remelting in dependence on processing parameters. Next, the thermal characteristics of the laser remelting process are introduced and their relation with processing parameters and achieved depth of remelting. Following are discussions on main effects influencing the measurement's outcome and lastly the assessment of developed method and generalized procedure of its application.

The PhD thesis has been solved within the study program Plasma Physics and Physics of Thin Films at the Department of Physics of Faculty of Applied Sciences in cooperation with

department Thermomechanics of Technological Processes of the institute New Technologies
Research Centre.

Literatura

- [1] PAWLOWSKI, Lech. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. Second edi. B.m.: John Wiley & Sons, Ltd., 2008. ISBN 978-0-471-49049-4.
- [2] KURODA, S, J. KAVATRIKA, M. WATANABE a H. KATANODA. Warm spraying – a novel coating process based on high-velocity impact of solid particles, *Topical Review. Science and Technology advanced materials*. 2008, roč. 9.
- [3] RAKHLES, M. *Laser Surface Modification of HVOF Coatings for Improvement of Corrosion and Wear Performance*. Manchester, 2013. University of Manchester.
- [4] PLANCHE, M. P. P, H. LIAO, B. NORMAND, C. CODDET, Normand B. a C. CODDET. Relationships between NiCrBSi particle characteristics and corresponding coating properties using different thermal spraying processes. *Surface and Coatings Technology*. 2005, roč. 200, č. 7, s. 2465–2473. ISSN 02578972.
- [5] *Nature of Thermal Spray Coatings* [online]. [vid. 11. leden 2018]. Získáno z: <http://www.gordonengland.co.uk/tsc.htm>
- [6] HOUDKOVÁ, Š., E. SMAZALOVÁ, M. VOSTŘÁK aj. SCHUBERT. Properties of NiCrBSi coating, as sprayed and remelted by different technologies. *Surface and Coatings Technology*. 2014, roč. 253, s. 14–26. ISSN 02578972.
- [7] NAVAS, C., R COLACO, J.de Da BORENEA a R VILAR. Abrasive wear behaviour of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings. *Coatings and Surface Technology*. 2006, roč. 200, s. 6854–6862.
- [8] GONZÁLEZ, R., M. CADENAS, R. FERNÁNDEZ, J.L. CORTIZO a E. RODRÍGUEZ. Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser. *Wear*. 2007, roč. 262, č. 3, s. 301–307. ISSN 00431648.
- [9] MIGUEL, J. M., J. M. GUILMANY a S. VIZCANO. Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes. *Tribology International*. 2003, roč. 86.

- [10] SURZHENKOV, A., P. KULU, R. TARBE, V. MIKLI, H. Sarjas a J. LATOKARTANO. Wear resistance of laser remelted thermally sprayed coatings. *Estonian Journal of Engineering*. 2009, roč. 15, s. 318–328.
- [11] SERRES, N., F. HLAWKA, S. COSTIL, C. LANGLADE a F. MACHI. An investigation of the mechanical properties and wear resistance of NiCrBSi coatings carried out by in situ laser remelting. *Wear*. 2011, roč. 270, s. 640–649.
- [12] TUOMINEN, J., P. VUORISTO MÄNTYLÄ, T. J. VIHINEN a P. H. ANDERSSON. Corrosion behavior of HVOF-sprayed and Nd-YAG laser remelted high-chromium, nickel-chromium coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2011, roč. 11, s. 233–243.
- [13] SERRES, N., F. HLAWKA, S. COSTIL, C. LANGLADE a F. MACHI. Microstructure of Metallic NiCrBSi Coatings manufactured via Hybrid Plasma Spray and In Situ Laser Remelting Process. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2011, roč. 20, s. 336–343.
- [14] SERRES, N., F. HLAWKA, S. COSTIL a C. LANGLADE. Corrosion properties of in situ laser remelted NiCrBSi coatings comparison with hard chromium coatings. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, roč. 211, s. 133–140.
- [15] CIUBOTARIU, C., D. FRUNZĂVERDE, G. MĂRGINEAN, V. ȘERBAN a A. BÎRDEANU. Optimization of the laser remelting process for HVOF-sprayed Stellite 6 wear resistant coatings. *Optics & Laser Technology*. 2016, roč. 77, s. 98–103. ISSN 00303992.
- [16] CUI, Ch., F. YE a G. SONG. Laser surface remelting of Fe-based alloy coatings deposited by HVOF. *Surface and Coatings Technology*. 2012, roč. 206, č. 8–9, s. 2388–2395. ISSN 02578972.
- [17] FARAHMAND, P. a R. KOVACEVIC. An experimental–numerical investigation of heat distribution and stress field in single- and multi-track laser cladding by a high-power direct diode laser. *Optics & Laser Technology*. 2014, roč. 63, s. 154–168. ISSN 0030-3992.

- [18] LI, J.F, L. LI a F.H. STOTT. Thermal stresses and their implication on cracking during laser melting of ceramic materials. *Acta Materialia*. 2004, roč. 52, č. 14, s. 4385–4398. ISSN 1359-6454.
- [19] LUGSCHEIDER, E., D. HOFMANN a A. R. NICOLL. Optimalization of Spraying Process and Laser Treatment of CoNiCrAlY. *Journal of Thermal Spray Technology*. 1992, roč. 1, s. 239–247.
- [20] MATĚJÍČEK, J. a P. HOLUB. Laser Remelting of Plasma-Sprayed Tungsten Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2014, roč. 23, s. 750–754.
- [21] UTU, D., G. MARGINEAN, Serban V. a Codrean C. Corrosion Behaviour of Laser Remelted CoNiCrAlY Based composite coatings. *Engineering*. 2010, roč. 2, s. 322–327.
- [22] LI, Ch., Y. WANG, L. GUO, J. HE, Z. PAN a L. WANG. Laser remelting of plasma-sprayed conventional and nanostructured Al₂O₃–13 wt.%TiO₂ coatings on titanium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010, roč. 506, s. 356–363.
- [23] WANG, Y., Ch. LI a T. W. GUO LIXIN. Laser remelting of plasma sprayed nanostructured Al₂O₃–TiO₂ coatings at different laser power. *Surface & Coatings Technology*. 2010, roč. 204, s. 3559–3566.
- [24] ION, J C. *Laser processing of engineering materials: Principles, Procedure and Industrial Application*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinmann, 2005.
- [25] HRUŠKA, M., M. VOSTŘÁK, E. SMAZALOVÁ, M. ŠVANTNER. Standard and scanning laser hardening procedure. In: *METAL 2013 - 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. B.m.: TANGER LTD, 2013, s. 1009–1014. ISBN 9788087294413.
- [26] HRUŠKA, M., M. VOSTŘÁK, E. SMAZALOVÁ a M. ŠVANTNER. 3D scanning laser hardening. In: *METAL 2014 - 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. B.m.: TANGER LTD, 2014, s. 921–926. ISBN 9788087294543.

- [27] VOSTŘÁK Marek, M. HRUŠKA, Š. HOUDKOVÁ, Laser re-melting of HVOF sprayed NiCrBSi coatings. In: *METAL 2013 - 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. B.m.: TANGER LTD, 2013, s. 921–925. ISBN 9788087294413.
- [28] YILBAS, B. S., A. F M ARIF a M. A. GONDAL. HVOF coating and laser treatment: Three-point bending tests. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005, roč. 164–165, s. 954–957. ISSN 09240136.
- [29] ZHANG, S., T. CHO, J. YOON, M. X. LI, P. W. SHUM a S. Ch. KWON. Investigation on microstructure, surface properties and anti-wear performance of HVOF sprayed WC-CrC-Ni coatings modified by laser heat treatment. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*. 2009, roč. 162, č. 2, s. 127–134. ISSN 09215107.
- [30] MARGINEAN, G., Doina FRUNZĂVERDE, D. UTU, R. CRÎSTA a W. BRANDL. Influence of Electron Beam and Laser Remelting on the Oxidation Behaviour of HVOF-sprayed CoNiCrAlY Coatings. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*. 2007, roč. 152, č. 1, s. 32–38. ISSN 0005-8912.
- [31] ZHAO, W, Y. WANG, T. HAN, K. WU a J. XUE. Electrochemical evaluation of corrosion resistance of NiCrBSi coatings deposited by HVOF. *Surface and Coatings Technology*. 2004, roč. 183, s. 118–125.
- [32] HOUDKOVÁ, Š., M. VOSTŘÁK, M. HRUŠKA, J. ŘÍHA, E. SMAZALOVÁ, Z. ČESÁNEK, J. SCHUBERT, Comparison of NiCrBSi coatings, HVOF sprayed, re-melted by flame and by high-power laser. In: *METAL 2013 - 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. 2013, s. 982–987. ISBN 9788087294413.
- [33] BERGANT, Z. a J. GRUM. Quality improvement of flame sprayed, heat treated, and Remelted NiCrBSi coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2009, roč. 18, č. 3.

- [34] SERRES, N., F. HLAWKA, S. COSTIL, C. LANGLADE, F. MACHI a A. CORNET. Dry coatings and ecodesign: Part. 2 — Tribological performances. *Surface and Coatings Technology*. 2009, roč. 204, č. 1, s. 197–204. ISSN 02578972.
- [35] DAVIS, J R (editor). *ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt and Their Alloys*. B.m.: ASM International, 2000. ISBN: 978-0-87170-685-0.
- [36] SIDHU, T. S., S. PRAKASH a R. D. AGRAWAL. Studies of the metallurgical and mechanical properties of high velocity oxy-fuel sprayed stellite-6 coatings on Ni- and Fe-based superalloys. *Surface and Coatings Technology*. 2006, roč. 201, s. 273–281.
- [37] SIDHU, T. S., S. PRAKASH a R. D. AGRAWAL. A comparative study of hot corrosion resistance of HVOF sprayed NiCrBSi and Stellite-6 coated Ni-based superalloy at 900 °C. *Materials Science and Engineering*. 2007, roč. 445–446, s. 210–218.
- [38] CINCA, M. a J. M. GUILMANY. Structural and properties characterization of stellite coatings obtained by cold gas spraying. *Surface and Coatings Technology*. 2013, roč. 220, s. 90–97.
- [39] CINCA, M., E. LOPÉZ, S. DOSTA a J. M. GUILMANY. Study of stellite-6 deposition by cold gas spraying. *Surface and Coatings Technology*. 2013, roč. 232, s. 891–898.
- [40] VOSTŘÁK M., M. HRUŠKA, Š. HOUDKOVÁ a E. SMAZALOVÁ. Coaxial laser cladding of stellite: Anylasis of process parameters. In: *METAL 2014 - 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. B.m.: TANGER LTD, 2014, s. 869–874.
- [41] VOSTŘÁK M., M. HRUŠKA, E. SMAZALOVÁ, Š. HOUDKOVÁ. Coaxial laser cladding: Influence of overlap. In: *METAL 2015 - 24th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. 2015. ISBN 9788087294628.
- [42] SIDHU, T. S. a S. PRAKASH. Studies on the behaviour of stellite-6 as plasma sprayed and laser remelted coatings in molten salt environment at 900 °C under cyclic conditions. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, roč. 172, s. 52–63.

- [43] HOUDKOVÁ, Š., Z. PALA, E. SMAZALOVÁ, M. VOSTŘÁK a Z. ČESÁNEK. Microstructure and sliding wear properties of HVOF sprayed, laser remelted and laser clad Stellite 6 coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2017, roč. 318, s. 129–141. ISSN 02578972.
- [44] TOYSERKANI, E., A. KHAJEPOUR a S. F. CORBIN. *Laser Cladding*. B.m.: CRC Press, 2004.
- [45] LEI, Y.P., H. MURAKAWA, Y.W. SHI a X.Y. LI. Numerical analysis of the competitive influence of Marangoni flow and evaporation on heat surface temperature and molten pool shape in laser surface remelting. *Computational Materials Science*. 2001, roč. 21, č. 3, s. 276–290. ISSN 0927-0256.
- [46] DEVESSE, W., D. DE BAERE a P. GUILLAUME. Design of a Model-based Controller with Temperature Feedback for Laser Cladding. *Physics Procedia*. 2014, roč. 56, s. 211–219. ISSN 1875-3892.
- [47] YILBAS, B.S., C. KARATAS, A.F.M. ARIF a B.J. ABDUL ALEEM. Laser control melting of alumina surfaces and thermal stress analysis. *Optics & Laser Technology*. 2011, roč. 43, č. 4, s. 858–865. ISSN 0030-3992.
- [48] LIU, J., Y. WANG, S. COSTIL a R. BOLOT. Numerical and experimental analysis of molten pool dimensions and residual stresses of NiCrBSi coating treated by laser post-remelting. *Surface and Coatings Technology*. 2017, roč. 318, s. 341–348. ISSN 0257-8972.
- [49] SANTHANAKRISHNAN, S. a R. KOVACEVIC. Hardness prediction in multi-pass direct diode laser heat treatment by on-line surface temperature monitoring. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012, roč. 212, s. 2261–2271.
- [50] HÖMBERG, D. a W. WEISS. PID Control of Laser Surface Hardening of Steel. *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY*. 2006, roč. 14, č. 5, s. 896–904.
- [51] TESAŘ, J., P. VACÍKOVA, O. SOUKUP a Š. HOUDKOVA. Infrared Camera Analysis of Laser Hardening. *Advances in Optical Technologies*. 2012, roč. 2012, s. 1 – 6. ISSN 1687-6393.

- [52] PAVLOV, M., D. NOVICHENKO a M. DOUBENSKAIA. Optical Diagnostics of Deposition of Metal Matrix Composites by Laser Cladding. *Physics Procedia*. 2011, roč. 12, s. 674–682. ISSN 1875-3892.
- [53] DOUBENSKAIA, M., M. PAVLOV, S. GRIGORIEV a I. SMUROV. Definition of brightness temperature and restoration of true temperature in laser cladding using infrared camera. *Surface & Coatings Technology*. 2013, roč. 220, s. 244–247. ISSN 0257-8972.
- [54] SMUROV, I., M. DOUBENSKAIA a A. ZAITSEV. Technology Comprehensive analysis of laser cladding by means of optical diagnostics and numerical simulation. *Surface & Coatings Technology*. 2013, roč. 220, s. 112–121. ISSN 0257-8972.
- [55] KRAUSS, H., T. ZEUGNER a M. F. ZAEHA. Layerwise Monitoring of the Selective Laser Melting Process by Thermography. *Physics Procedia*. 2014, roč. 56, s. 64–71.
- [56] CHIVEL, Yu. a I. SMUROV. On-line temperature monitoring in selective laser sintering/melting. *Physics Procedia*. 2010, roč. 5, s. 515–521.
- [57] ROMBOUTS, M., J. P. KRUTH, L. FROYEN a P. MERCELIS. Fundamentals of selective laser melting of alloyed steel powders. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2006, roč. 55, s. 187–192.
- [58] CRAEGHS, T., F. BECHMANN, S. BERUMEN aj. P. KRUTH. Feedback control of layerwise laser melting using optical sensors. *Physics Procedia*. 2010, roč. 5, s. 505–514.
- [59] PAVLOV, M., M. DOUBENSKAIA a I. SMUROV. Pyrometric analysis of thermal processes in SLM technology. *Physics Procedia*. nedatováno, roč. 5, s. 523–531.
- [60] CRAEGHS, T., S. CLIJSTERS, J. P. KRUTH, F. BECHMANN a M. C. EBERT. Detection of process failures in layerwise laser melting with optical process monitoring. *Physics Procedia*. 2012, roč. 39, s. 753–759.
- [61] ISLAM, M., T. PURTONEN, H. PIILI, A. SALMINEN a O. NYRHILÄ. Temperature Profile and Imaging Analysis of Laser Additive Manufacturing of Stainless Steel. *Physics Procedia*. 2013, roč. 41, s. 835–842.

- [62] KUNEŠ, J., Z. VESELÝ a M. HONNER. *Tepelné bariéry*. 1. vyd. 2003. ISBN 80-200-1218-4.
- [63] VESELÝ, Z. Modelování tepelných procesů ve fyzikálních technologiích, přednášky předmětu. 2014.
- [64] HONNER, M. *Měření ve fyzikálních technologiích, texty k laboratorním cvičením*. B.m.: Západočeská univerzita v Plzni, 2003. ISBN 80-7082-971-0.
- [65] TESAŘ, J. *Termografie v plazmových a laserových technologiích*. Plzeň, 2014. Západočeská Univerzita v Plzni.
- [66] LOTT, P, H. SCHLEIFENBAUM, W. MEINERS, K. WISSENBACH, C. HINKE a J. BÜLTMANN. Design of an optical system for the in situ process monitoring of selective laser melting (SLM). *Physics Procedia*. 2011, roč. 12, s. 683–690.
- [67] PURTONENA, T., A. KALLIOSAARIA a A. SALMINENA. Monitoring and Adaptive Control of Laser Processes. *Physics Procedia*. 2014, roč. 56, s. 1218–1231.
- [68] LITOŠ, P. *Termovize a infradetektory ve fyzice technologických procesů*. Plzeň, 2002. Západočeská univerzita v plzni.
- [69] LÍBAL, J. *Využití termovizní kamery pro měření teploty elektrických strojů*. Brno, 2009. Vysoké učení v Brně.
- [70] LITOŠ, P. *Měření emisivity a teplotních polí ve fyzikálních technologiích*. Plzeň, 2006. Západočeská Univerzita v Plzni.
- [71] ROGALSKI, A. Infrared detectors: status and trends. *Progress in Quantum Electronics*. 2003, roč. 27, s. 59–210.
- [72] BHAN, R. K., R. S. SAXENA, C. R. JALWANIA a S. K. LOMASH. Uncooled Infrared Microbolometer Arrays and their Characterisation Techniques. *Defence Science Journal*. 2009, roč. 59, s. 580–589.
- [73] HOLST, G. C. *Common sense approach to thermal imaging*. Florida: JCD Publishing, 2000. ISBN ISBN 0-8194-3722-0.

- [74] HONNER, M. *Infračervená kvantitativní termografie ve výzkumu fyzikálních technologií*. B.m., 2004. Západočeská univerzita v Plzni.
- [75] KATO, M., J. R. PUGH a D. MCGLINCHEY. The influence of windows on infra-red temperature measurements for solids' mass flow rate determination. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2012, roč. 27, s. 99–103. ISSN 09555986.
- [76] HERVE, P, J. CEDELLE a I. NEGREANU. Infrared technique for simultaneous determination of temperature and emissivity. *Infrared Physics & Technology*. 2012, roč. 55, s. 1–10.
- [77] COHERENT. *Operator's Manual Highlight ISL-4000L Industrial Laser System*. Santa Clara: Coherent, nedatováno.
- [78] FST FLAME SPRAYED TECHNOLOGIES. *FST powders* [online]. 2017.
- [79] LUPOI, R., A. COCKBURN, Ch. BRYAN, M. SPARKES, F. LUO a W. O'NEILL. Hardfacing steel with nanostructured coatings of Stellite-6 by supersonic laser deposition. *Light: Science & Applications*. 2012, roč. 1, č. March, s. e10. ISSN 2047-7538.
- [80] KENNAMETAL STELLITE. *Stellite 6 Alloy Technical Data* [online]. Získáno z: http://stellite.com/Portals/0/KMT_Stellite_6Alloy_Data_FINAL.pdf
- [81] *FLIR A315 / A615 | FLIR Systems* [online]. [vid. 3. únor 2017]. Získáno z: <http://www.flir.com/automation/display/?id=41330>
- [82] JENOPTIK INFRATEC. *VarioCAM ® hr head Thermographic Solution for Use in Industry and Research* [online]. [vid. 3. únor 2017]. Získáno z: http://www.infratec.eu/fileadmin/downloads/pdf/VC_hr/VC_hr_head_en.pdf
- [83] LUMASENSE. *Thermal imaging camera MCS640 for high-temperature applications e.g. on metal surfaces*. [online]. [vid. 7. březen 2017]. Získáno z: <https://www.lumasenseinc.com/EN/products/temperature-measurement/thermal-imagers-systems/mikron-cameras/mc640-series/thermal-imager-mcs640.html>

- [84] LARRICK, T. *Understanding Modern Infrared Pyrometers for Demanding Steel Mill Applications* [online]. Získáno z: http://cdn2.hubspot.net/hub/297742/file-351495034-pdf/White_Paper_-_Pyrometers_for_Steel_Mills_Overview.pdf
- [85] SCHIEWE, Ch. The influence of the emissivity on the non-contact temperature measurement. *Messtec drives Automation 3/2014* [online]. Získáno z: http://www.dias-infrared.com/wp-content/uploads/sites/2/2013/03/Influence_Of_Emissivity.pdf
- [86] TESAŘ, J., J. MARTAN a J. SKALA. The influence of emissivity on measured temperature in dependence on spectral range of IR camera detector and its approximate calculation. In: *Quantitative Infrared Thermography conference, QIRT 2016*,. 2016, s. 89–99.
- [87] MICRO-EPSILON. *Basics of non contact temperature measurement* [online]. 2011. Získáno z: <http://www.micro-epsilon.com/download/products/dat--infrared-basics--en.pdf>
- [88] HYUNGSON, K., S. SANGWOO a K. SANSEO. Laser transformation hardening of carbon steel sheets using a heat sink. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014, roč. 214, č. 11, s. 2693–2705. ISSN 09240136.
- [89] WWW.MATBASE.COM. *C45 (EN) / 1.0503 (EN) Medium-carbon Steel* [online]. [vid. 26. červenec 2016]. Získáno z: <https://www.matbase.com/material-categories/metals/ferrous-metals/high-grade-steel/material-properties-of-high-grade-steel-c45.html#properties>
- [90] HAMATANI, H, Y ICHIYAMA a J KOBAYASHI. Mechanical and thermal properties of HVOF sprayed Ni based alloys with carbide. *Science and Technology of Advanced Materials* . 2002, roč. 3, s. 319–326.

Seznam publikovaných prací autora

Články v recenzovaných a impaktovaných časopisech

- [I] VOSTŘÁK, M., HOUDKOVÁ Š., Bystrianský, M., ČESÁNEK, Z. The Influence of Process Parameters on Structure and Abrasive Wear Resistance of Laser Clad WC-NiCrBSi Coatings, *Materials Research Express*, 2018, <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aad859>
- [II] VOSTŘÁK, M., TESAŘ, J., HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ, Š., SMAZALOVÁ, E., HRUŠKA, M. Diagnostics of Laser remelting of HVOF sprayed stellite coatings using an infrared camera. *Surface and Coatings Technology*, 2017, roč. 318, č. MAY 25 2017, s. 360-364. ISSN: 0257-8972
- [III] HOUDKOVÁ - ŠIMŮNKOVÁ, Š., PALA, Z., SMAZALOVÁ, E., VOSTŘÁK, M., ČESÁNEK, Z. Microstructure and sliding wear properties of HVOF sprayed, laser remelted and laser clad Stellite 6 coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2017, roč. 318, č. MAY 25 2017, s. 129-141. ISSN: 0257-8972
- [IV] LOEWENHOFF, T., LINKE, J. M., MATĚJÍČEK, J., RASIŃSKI, M., VOSTŘÁK, M., WIRTZ, M. Laser re-melting of tungsten damaged by transient heat loads. *Nuclear Materials and Energy*, 2016, roč. 9, č. 1 December 2016, s. 165-170. ISSN: 2352-1791
- [V] HOUDKOVÁ - ŠIMŮNKOVÁ, Š., SMAZALOVÁ, E., VOSTŘÁK, M., SCHUBERT, J. Properties of NiCrBSi coating, as sprayed and remelted by different technologies. *Surface and Coatings Technology*, 2014, roč. 253, č. srpen 2014, s. 14-26. ISSN: 0257-8972

Příspěvky na konferencích

- [VI] VOSTŘÁK, M., TESAŘ, J., HOUDKOVÁ, Š., HONNER, M.: Diagnostics of laser remelting of thermally sprayed coatings using an infrared camera, 8th International Conference and Exhibition on Lasers, Optics & Photonics, November 15-17, 2017, Las Vegas, USA, *J. Lasers, Optics & Photonics 2017*, 4:4 (Suppl), DOI: 10.4172/2469-410X-C1-017 - pozvaná přednáška

- [VII] VOSTŘÁK, M., HOUDKOVÁ, Š., ČESÁNEK, Z.: The influence of process parameters on structure and functional properties of laser clad WC-NiCrBSi coating, Conference proceedings ITSC 2017, DVS Media GmbH, Düsseldorf 2017, pp 1080 -1085
- [VIII] VOSTŘÁK, M., TESAŘ, J., HOUDKOVÁ, Š., HRUŠKA, M.: Possibilities of Controlling the Depth of Remelting During Laser Remelting of Thermally Sprayed Coating by Means of Infrared Thermography, In *METAL 2017-26th International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: TANGER Ltd, 2017. s. 1158-1163. ISBN: ISBN 978-80-87294-79-6
- [IX] HRUŠKA, M., VOSTŘÁK, M.: The Impact of Controlled EN 10083-2 C45 Steel Surface Oxidation on NIR Light Absorption, In *METAL 2017-26th International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: TANGER Ltd, 2017. s. 1153-1157. ISBN: ISBN 978-80-87294-79-6
- [X] HOUDKOVÁ Š., ČESÁNEK Z., VOSTŘÁK, M. et all: Microstructure and Properties of Heat-Affected HVOF Sprayed Hastelloy C-276 Coating, In *METAL 2017-26th International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: TANGER Ltd, 2017. s. 1104-1109. ISBN: ISBN 978-80-87294-79-6
- [XI] HRUŠKA, M., TESAŘ, J., VOSTŘÁK, M., SMAZALOVÁ, E. The Effect of the Material Surface Oxidation on Laser Light Absorption, In *4. MEZINÁRODNÍ KONFERENCE MODERNÍ TRENDY KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ*. Bristol: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 179 (1), art. no. 012029,
- [XII] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HOUDKOVÁ - ŠIMŮNKOVÁ, Š., SMAZALOVÁ, E. COAXIAL LASER CLADDING OF INTERNAL DIAMETER. In *METAL 2016-25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: TANGER Ltd, 2016. s. 957-962. ISBN: 978-80-87294-67-3
- [XIII] HOUDKOVÁ - ŠIMŮNKOVÁ, Š., VOSTŘÁK, M., ČESÁNEK, Z. THE INFLUENCE OF PROCESSING PARAMETERS ON THE MICROSTRUCTURE OF WCNiCrBSi LASER CLAD COATINGS. In *METAL 2016-25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: TANGER Ltd, 2016. s. 963-968. ISBN: 978-80-87294-67-3

- [XIV] HRUŠKA, M., TESAŘ, J., VOSTŘÁK, M., SMAZALOVÁ, E. THE INFLUENCE OF THE SURFACE OPTICAL PROPERTIES MODIFICATION ON ABSORPTION OF LASER RADIATION. In *METAL 2016-25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: TANGER Ltd, 2016. s. 983-988. ISBN: 978-80-87294-67-3
- [XV] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., SMAZALOVÁ, E., HOUDKOVÁ - ŠIMŮNKOVÁ, Š. Coaxial Laser Cladding: Influence of Overlap. In *METAL 2015 - 24th International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostava: Tanger Ltd., 2015. s. 1016-1021. ISBN: 978-80-87294-62-8
- [XVI] HRUŠKA, M., VOSTŘÁK, M., SMAZALOVÁ, E. LASER HARDENING OF MILLING HEAD WITH EMPHASIS ON MINIMAL DEFORMATION. In *METAL 2015 - 24th International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostava: Tanger Ltd., 2015. s. 1046-1051. ISBN: 978-80-87294-62-8
- [XVII] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HOUDKOVÁ - ŠIMŮNKOVÁ, Š., SMAZALOVÁ, E. Coaxial Laser Cladding of Stellite: Analysis of Process Parameters. In *METAL 2014*. Ostrava: TANGER spol. s r. o., 2014. s. 1-6. ISBN: 978-80-87294-54-3
- [XVIII] HRUŠKA, M., VOSTŘÁK, M., SMAZALOVÁ, E., ŠVANTNER, M. 3D scanning laser hardening. In *METAL 2014*. Ostrava: TANGER spol. s r. o., 2014. s. 921-926. ISBN: 978-80-87294-54-3
- [XIX] HOUDKOVÁ - ŠIMŮNKOVÁ, Š., VOSTŘÁK, M., SMAZALOVÁ, E., HRUŠKA, M. LASER SUFRACE REMELTING OF HVOF SPRAYED Co-Cr-W COATING. In *METAL 2015 - 24th International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostava: Tanger Ltd., 2015. s. 947-952. ISBN: 978-80-87294-62-8
- [XX] HOUDKOVÁ - ŠIMŮNKOVÁ, Š., SMAZALOVÁ, E., BLÁHOVÁ, O., VOSTŘÁK, M. Mechanical Properties of HVOF Sprayed, Flame and Laser Remelted NiCrBSi Coatings. In *Key Engineering Materials*. Stafa-Zurich: Trans Tech Publications LTD, 2014. s. 179-182. ISBN: 978-3-03835-062-0
- [XXI] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HOUDKOVÁ - ŠIMŮNKOVÁ, Š. Laser remelting of HVOF sprayed NiCrBSi coatings. In *Conference Metal 2013 proceedings*. Ostrava: TANGER, 2013. s. 921-925. ISBN: 978-80-87294-41-3

- [XXII] HRUŠKA, M., VOSTŘÁK, M., SMAZALOVÁ, E., ŠVANTNER, M. Standard and scanning laser hardening procedure. In *Conference Metal 2013 proceedings*. Ostrava: TANGER, 2013. s. 1009-1014. ISBN: 978-80-87294-41-3
- [XXIII] HOUDKOVÁ - ŠIMŮNKOVÁ, Š., VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., ŘÍHA, J., SMAZALOVÁ, E., ČESÁNEK, Z., SCHUBERT, J. Comparison of NiCrBSi coatings, HVOF sprayed, remelted by flame and by high-power laser. In *Conference Metal 2013 proceedings*. Ostrava: TANGER, 2013. s. 982-987. ISBN: 978-80-87294-41-3
- [XXIV] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HOUDKOVÁ - ŠIMŮNKOVÁ, Š. Laser Remelting of HVOF Sprayed NiCrBSi. In *Vrstvy a povlaky 2013*. Trenčín: Miloš Vavrlík - Kníhviazačstvo, 2013. s. 167-172. ISBN: 978-80-970824-2-0
- [XXV] HRUŠKA, M., VOSTŘÁK, M., SMAZALOVÁ, E., ŠVANTNER, M. Standard and scanning laser hardening procedure. In *Vrstvy a povlaky 2013*. Trenčín: Miloš Vavrlík - Kníhviazačstvo, 2013. s. 49-54. ISBN: 978-80-970824-2-0
- [XXVI] HOUDKOVÁ - ŠIMŮNKOVÁ, Š., SMAZALOVÁ, E., VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., ČESÁNEK, Z., SCHUBERT, J. Vliv následného přetavení plamenem a HPDD laserem na mikrostrukturu a vlastnosti HVOF nástřiku NiCrBSi. In *Vrstvy a povlaky 2013*. Trenčín: Miloš Vavrlík - Kníhviazačstvo, 2013. s. 39-44. ISBN: 978-80-970824-2-0
- [XXVII] VOSTŘÁK, M., PETIT, A., MATHIAS, J., SEMMAR, N. Laser micromachining: Comparison of different wavelengths and pulse durations. In *Vrstvy a povlaky 2011*. Trenčín: Miloš Vavrlík - Kníhviazačstvo, Trenčín, 2011. s. 189-194. ISBN: 978-80-970824-0-6

Výzkumné zprávy

- [XXVIII] HOUDKOVÁ - ŠIMŮNKOVÁ, Š., VOSTŘÁK, M., KUČERA, M. Laser treatment. Honeywell International s.r.o., 2016.
- [XXIX] VOSTŘÁK, M., SMAZALOVÁ, E., HOUDKOVÁ - ŠIMŮNKOVÁ, Š. Development of parameters for laser remelting. Honeywell International s.r.o., 2015.
- [XXX] HRUŠKA, M., KOHLSCHÜTTER, T., LANG, V., VOSTŘÁK, M. Systém měření rovinnosti solárních článků. 2013.

Výsledky aplikovaného výzkumu

- [XXXI] LANG, V., VOSTŘÁK, M., BARTÍK, J. *Funkční vzorek LED solárního simulátoru*. 2010.
- [XXXII] HONNER, M., HRUŠKA, M., SOUKUP, O., VOSTŘÁK, M. *Prototyp hřídele LK č. UP303247*. 2011.
- [XXXIII] HRUŠKA, M., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp pro ověření technologie výroby čepu závěsu s označením DO557223*. 2012.
- [XXXIV] HRUŠKA, M., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp pro ověření technologie výroby čepu závěsu s označením DO557224*. 2012.
- [XXXV] HRUŠKA, M., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp pro ověření technologie výroby čepu s označením DBOA\ -00246*. 2012.
- [XXXVI] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HONNER, M. *Technologie povrchového kalení hřídelí HPDD laserem*. 2011.
- [XXXVII] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HONNER, M. *Ověřená technologie laserového kalení ČEPU ZÁVĚSU s označením DO557223*. 2012.
- [XXXVIII] HRUŠKA, M., SOUKUP, O., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp SEDLA LK LO512240*. 2011.
- [XXXIX] HRUŠKA, M., SOUKUP, O., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp upínky LK 4221684*. 2011.
- [XL] HRUŠKA, M., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp pro ověření technologie výroby čepu závěsu s označením DO557854*. 2012.
- [XLI] HRUŠKA, M., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp pro ověření technologie výroby držáku s označením HO S OB03859/1*. 2012.
- [XLII] LANG, V., HRUŠKA, M., KLEPÁČEK, J., KOHLSCHÜTTER, T., VOSTŘÁK, M. *Funkční vzorek zařízení pro měření pole rovinnosti solárních článků*. 2013.
- [XLIII] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HONNER, M. *Technologie povrchového kalení čepů HPDD laserem*. 2011.
- [XLIV] HRUŠKA, M., SOUKUP, O., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp VAGONOVÉHO ZÁVĚSU LK s označením LO210384*. 2011.
- [XLV] HRUŠKA, M., SOUKUP, O., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp LOŽISKOVÉHO POUZDRA LK OB169567*. 2011.
- [XLVI] HRUŠKA, M., SOUKUP, O., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp otočného čepu LK LO 519324*. 2011.

- [XLVII] HRUŠKA, M., SOUKUP, O., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp čepu LK 4219982*. 2011.
- [XLVIII] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HONNER, M. *Technologie povrchového kalení závěsů HPDD laserem*. 2011.
- [XLIX] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HONNER, M. *Technologie povrchového kalení ložiskových pouzder HPDD laserem*. 2011.
- [L] ŠVANTNER, M., HONNER, M., VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M. *Zařízení pro vytváření povrchů o vysoké drsnosti a specifických mechanických vlastnostech*. Praha, 2013.
- [LI] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HONNER, M. *Technologie povrchového kalení volných kladek HPDD laserem*. 2011.
- [LII] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HONNER, M. *Ověřená technologie výroby čepu s označením 7S31904117*. 2012.
- [LIII] HRUŠKA, M., SOUKUP, O., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp kladky LK UP303254*. 2011.
- [LIV] HRUŠKA, M., SOUKUP, O., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp tvárníku LK č. 443*. 2011.
- [LV] HRUŠKA, M., SOUKUP, O., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp tvárnice LK č. 443*. 2011.
- [LVI] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., KUČERA, M., HONNER, M. *Funkční vzorek 400 W laserového systému pro řezání*. 2011.
- [LVII] HRUŠKA, M., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp pro ověření technologie výroby čepu s označením 7S31904117*. 2012.
- [LVIII] HRUŠKA, M., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp pro ověření technologie výroby nožového držáku s označením Nu102026*. 2012.
- [LIX] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HONNER, M. *Technologie povrchového kalení sedel HPDD laserem*. 2011.
- [LX] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HONNER, M. *Technologie povrchového kalení upínek HPDD laserem*. 2011.
- [LXI] HRUŠKA, M., SOUKUP, O., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp hřebenu LK Ob 606826*. 2011.
- [LXII] HRUŠKA, M., SOUKUP, O., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp čepu tlumiče LK LO333505*. 2011.

- [LXIII] HONNER, M., ŠVANTNER, M., HRUŠKA, M., VOSTŘÁK, M. *Prototyp povlakovacího systému s HPDD laserem pro vytváření povlaků o vysoké drsnosti*. 2012.
- [LXIV] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HONNER, M. *Technologie povrchového kalení hřebenů HPDD laserem*. 2011.
- [LXV] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HONNER, M. *Technologie povrchového kalení kladek HPDD laserem*. 2011.
- [LXVI] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HONNER, M. *Technologie povrchového kalení čepů tlumiče HPDD laserem*. 2011.
- [LXVII] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HONNER, M. *Ověřená technologie výroby čepu s označením DBOA\00246*. 2012.
- [LXVIII] HRUŠKA, M., SOUKUP, O., VOSTŘÁK, M., HONNER, M. *Prototyp volné kladky LK Ø400 č. UP303855*. 2011.
- [LXIX] HONNER, M., SOUKUP, O., HRUŠKA, M., VOSTŘÁK, M. *Laserové kalení robotizovaným HPDD laserem*. 2011.
- [LXX] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HONNER, M. *Ověřená technologie výroby držáku s označením HO S OB03859/1*. 2012.
- [LXXI] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HONNER, M. *Ověřená technologie výroby nožového držáku s označením Nu102026*. 2012.
- [LXXII] HONNER, M., FRANC, A., ŠROUB, J., HRUŠKA, M., VOSTŘÁK, M., LANG, V. *Prototyp robotizovaného laserového technologického systému s 5 kW diskovým laserem*. 2011.
- [LXXIII] KUČERA, M., LANG, V., VOSTŘÁK, M. *Prototyp robotizovaného mikroobráběcího technologického systému s kontinuálním 400W vláknovým laserem*. 2011.
- [LXXIV] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HONNER, M. *Funkční vzorek systému pro bezkontaktní měření teplotních a deformačních polí*. 2013.
- [LXXV] VOSTŘÁK, M., HRUŠKA, M., HONNER, M. *Technologie povrchového kalení otočných čepů HPDD laserem*. 2011.